



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DEMONSTRAČNÍ ZAŘÍZENÍ PRO SKLÍZENÍ ENERGIE Z VIBRACÍ

VIBRATIONAL ENERGY HARVESTING DEMONSTRATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Uhliar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Mrnka

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Marek Uhliar

ID: 154900

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Demonstrační zařízení pro sklizení energie z vibrací

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku sklizení energie, zaměřte se přitom na sklizení z mechanických vibrací. Zamyslete se nad potenciálními zdroji vibrací, které by bylo možné pro funkci zařízení využít. Udělejte průzkum dostupných modulů na současném trhu a stručně popište princip jejich fungování. Pro vhodně zvolený modul navrhnete pomocné obvody.

Demonstrace se předpokládá na napájení MCU, které bude vyčítat data z teplotního senzoru a zobrazovat teplotu na LCD displeji. Na základě navrženého schématu navrhnete layout desky plošných spojů, desku zadejte do výroby, vyrobenou desku osadte součástkami a vytvořte firmware k demonstračnímu modulu. Funkci zařízení ověřte měřením. Součástí práce bude otestování navrženého zařízení jako zdroje napětí pro různé typy a intenzitu vibrací.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PARADISO, J.A., STARNER, T. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. Pervasive Computing, IEEE, vol.4, no.1, pp.18,27, Jan.-March 2005.

[2] Pro-wave, Piezoelectric Film Sensors [online], [cit. 26. ledna 2016]. Dostupné na [www: http://www.prowave.com.tw/english/products/pp/film.htm](http://www.prowave.com.tw/english/products/pp/film.htm).

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 30.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Michal Mrnka

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cieľom práce je riešenie problému zberu energie z vibrácií, premenu na elektrickú energiu, ktorá môže byť vhodne využitá koncovým zariadením. V ďalšej časti oboznamuje čitateľa s možnými obvodmi, ktoré môžu byť použité pri spracovávaní nazbieranej elektrickej energie. Posledná časť práce sa zaoberá návrhom pomocných obvodov pre zber energie a samotným návrhom demonštračného zariadenia ktoré bude premenenú energiu využívať na meranie teploty a vlhkosti vzduchu. Namerané hodnoty budú následne zobrazené na LCD.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Zber energie, elektro-magnetický generátor, elektrostatický generátor, piezoelektrický generátor, demonštračné zariadenie

ABSTRACT

The aim of the thesis is to solve the problem of energy collection from vibrations, transformation into electric energy, which can be suitably used by the end device. In the next section, the reader is acquainted with possible circuits that can be used to process the collected electrical energy. The last part of the thesis deals with the design of the auxiliary circuits for energy collection and with the design of the demonstration device, which will use the converted energy to measure the air temperature and humidity. The measured values will then be displayed on the LCD.

KEYWORDS

Energy harvesting, electro-magnetic generator, electrostatic generator, piezoelectric generator, demonstration device

UHLIAR, M. Demonstrační zařízení pro sklízení energie z vibrací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Mrnka.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že bakalársku prácu na tému Demonštračné zariadenie na zber energie z vibrácií som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením som neporušil autorská práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušením ustanovení § 11 a nasledujúcich zákona č. 121/2000 Sb., o autorskom práve, o právach súvisiacich s autorským právom a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

OBSAH

1	Zber energie z vibrácií	10
1.1	Zdroje vibrácií.....	11
1.2	Typy generátorov	11
1.2.1	Elektromagnetický generátor	12
1.2.2	Piezoelektrický generátor	13
1.2.3	Elektrostatický generátor	14
1.2.4	Porovnanie generátorov	15
1.3	Dostupnosť generátorov.....	15
2	Výber a Ladenie generátora	16
2.1	Piezoelektrický filmový senzor Pro-Wave FS-2513P	17
2.2	Piezoelektrický menič KINGSTATE KPSG-100.....	18
2.3	Ladenie rezonančnej frekvencie	19
3	Integrované obvody pre zber energie	20
3.1	Usmerňovač	20
3.1.1	Jednocestný usmerňovač.....	20
3.1.2	Dvojcestný mostíkový usmerňovač	21
3.2	Menič DC/DC	21
3.2.1	Menič typu Buck.....	21
3.2.2	Menič typu Boost.....	22
3.2.3	Menič typu Buck-Boost.....	23
4	Návrh zariadenia	24
4.1	Napájacia časť.....	24
4.2	Číslicová časť.....	28
4.3	Meranie teploty a vlhkosti	30
4.3.1	Výpočet teploty.....	31
4.3.2	Výpočet vlhkosti	31
4.4	Časovač.....	32

5	Oživenie a ladenie	34
5.1	Vplyv programu na spotrebu	34
5.2	Výber kondenzátora pre uschovanie energie	37
5.2.1	Pôsobenie vibrácií na elektroniku	38
6	Záver	40
A.1	Schéma zapojenia číslicovej časti	44
A.2	Doska plošného spoja číslicovej časti TOP	45
A.3	Doska plošného spoja číslicovej časti BOTTOM	45
A.4	Osadzovací plán číslicovej časti TOP	46
A.5	Osadzovací plán číslicovej časti BOTTOM	46
B.1	Schéma zapojenia napájacej časti	47
B.2	Doska plošného spoja napájacej časti TOP	48
B.3	Doska plošného spoja napájacej časti BOTTOM	48
B.4	Osadzovací plán napájacej časti TOP	49
B.5	Osadzovací plán napájacej časti BOTTOM	49
C.1	Číslicová časť	50
C.2	Napájacia časť	51
D.1	Technický výkres krabičky	52
D.2	Technický výkres viečka na krabičku	53

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Bloková schéma zariadenia na zber energie z vibrácií [3]	10
Obr. 2: Elektromagnetický generátor, prevzaté z [5].....	12
Obr. 3: Príklad piezoelektrického generátora v móde 31, prevzaté z [6]	13
Obr. 4: MEMS štruktúra elektrostatického generátora, prevzaté z [4]	14
Obr. 5 KINGSTATE KPSG-100	16
Obr. 6 Pro-Wave FS-2513P	16
Obr. 7 Zmena výstupného napätia naprázdno FS-2513P	17
Obr. 8 Výstupný výkon FS-2513P do záťaže 50k Ω a závaží 0,5 g	17
Obr. 9 Finálne rozmery meniča KPSG-100.....	18
Obr. 10 Výstupný výkon KPSG-100 do záťaže 50 k Ω a závaží 0,5 g	18
Obr. 11 Zmena rezonančnej frekvencie generátora KINGSTATE KPSG-100	19
Obr. 12 a) jednocestný usmerňovač, b) mostíkový dvojcestný usmerňovač.....	20
Obr. 13 Základné zapojenie meniča typu Buck, prevzaté z[9]	21
Obr. 14 Menič typu Buck- upravené zapojenie, prevzaté z [9]	22
Obr. 15 Menič typu Boost, prevzaté z [9].....	22
Obr. 16 Buck-Boost menič s dvoma spínačmi v Buck móde, prevzaté z [11]	23
Obr. 17 Buck-Boost menič s dvoma spínačmi v Boost móde, prevzaté z [11]	23
Obr. 18 Blokové zapojenie LTC3588-1 prevzaté z [12]	24
Obr. 19 Testovacie zapojenie.....	25
Obr. 20 DPS pre potreby merania.....	26
Obr. 21 Priebeh nabíjania C ₂ -modrá C ₄ -červená	27
Obr. 22 Meranie vibrácií pomocou MPU6050	27
Obr. 23 HF-1138P segmentové LCD prevzaté z [14]	29
Obr. 24 Bloková schéma HDC1080[15].....	30
Obr. 25 Schéma zapojenia časovača.....	32
Obr. 26 Výsledný priebeh programu	36
Obr. 27 Prepínanie napájacích režimov počas merania a zobrazenia.....	37
Obr. 28 Poškodené LCD následkom vibrácií	38
Obr. 29 Poškodenie meniča vibráciami	39
Obr. 30 Povrch meniča po 100 hodinách (77Hz 2 m/s ⁻² , zväčšenie mikroskopu 80x)	39

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1: Zoznam možných zdrojov vibrácií v domácnosti [2]	11
Tab. 2 Prehľad piezoelektrických štruktúr	13
Tab. 3 Maximálne dosiahnuteľné hodnoty energie[4]	15
Tab. 4 Najväčší výrobcovia piezoelektrických generátorov	15
Tab. 5 Nastavenie výstupného napätia	25
Tab. 6 Prehľad možných výstupných napätí	25
Tab. 7 Koeficienty pre vzorec (4.8)	33
Tab. 8 Najčastejšie používané časové intervaly	33
Tab. 9 Spotreba MCU bez optimalizácie programu	34
Tab. 10 Spotreba MCU s vypnutými nevyužitými vývodmi	35
Tab. 11 Spotreba MCU s vypnutými nevyužitými vývodmi a zapnutým režimom shut-down	35
Tab. 12 Spotreba MCU s vypnutými nevyužitými vývodmi, nahradením čakania za spánok s prerušením a zapnutým režimom shut-down	36

ÚVOD

Všetky procesy, ktoré zahrňujú premenu energie sú do určitej miery neefektívne. Motory, výkonové tranzistory, žiarovky produkujú jalové teplo. Zariadenia na zber energie majú za úlohu zber tejto skoro nevyužitej energie a premeniť ju na energiu elektrickú, ktorú môžu využiť iné zariadenia pre svoju činnosť. Najznámejšie zariadenia pre zber energie sú solárne panely a veterné turbíny, ktoré sa stali hlavnými alternatívnymi zdrojmi energie pre elektrické rozvodné siete. Moderné embedded zariadenia sa môžu spoliehať aj na menej výkonne zdroje, vďaka čomu môžeme zužitkovať aj výkony v rádoch miliwattov či dokonca aj mikrowattov z rôznych zdrojov energie, ako napríklad: solárnej, termoelektrickej, elektromagnetickej či piezoelektrickej.

Táto práca bude ďalej systematicky oboznamovať o využití mechanickej energie (vibrácie) jej premenu na energiu elektrickú, možnosti jej uskladnenia a využitia pre napájanie zariadení, ktoré potrebujú pre svoju činnosť minimum elektrickej energie. Následne bude popisovať: výber s ladenie generátora, ktorý bude použitý na napájanie demonštračného obvodu, návrh demonštračného obvodu, ktorý bude merať teplotu a vlhkosť. Namerané hodnoty budú následne zobrazené na LCD.

1 ZBER ENERGIE Z VIBRÁCIÍ

Pokročilá miniaturizácia v elektrotechnike prispieva k postupnému znižovaniu energetickej náročnosti elektrických zariadení, čím otvára dvere k návrhu elektroniky, ktorá bude pre svoju činnosť využívať pasívne zdroje energie. Takto napájané zariadenia majú skoro neobmedzenú životnosť, za predpokladu že energia vo forme vibrácií sa bude v prostredí, kde je zariadenie umiestnené naďalej vyskytovať. Ich spoľahlivosť je závislá už len na mechanickej konštrukcii a časovej degradácii použitých komponentov [1].

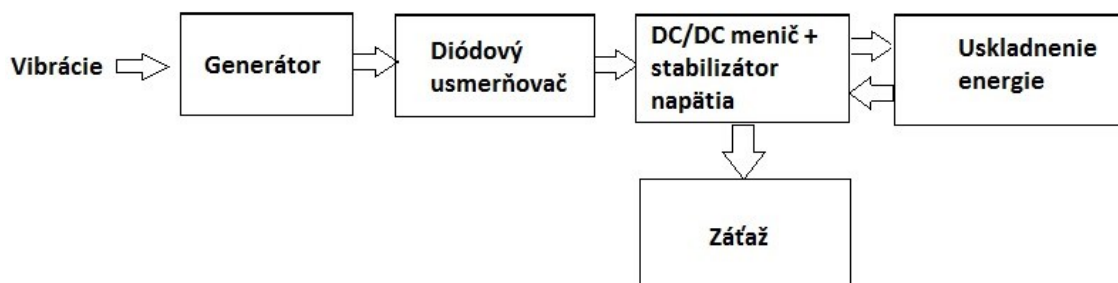
Podľa možnosti zariadenia uskladňovať energiu, ich môžeme deliť na:

- Zariadenia na zber energie z vibrácií bez možnosti uskladnenia el. energie
- Zariadenia na zber energie z vibrácií s možnosťou uskladnenia el. energie

Pod pojmom zariadenia na zber energie z vibrácií bez možnosti uskladnenia energie môžeme rozumieť zariadenia, ktoré nevyužívajú systém uskladnenia energie. Napájaná elektronika, ďalej len záťaž, tým potrebuje pre svoju činnosť sústavný, neprerušovaný zdroj vibrácií.

Zariadenia na zber energie z vibrácií s možnosťou uskladnenia energie využívajú akumulátor, alebo kondenzátor na uskladnenie prebytočnej energie. Tento typ je najviac rozšírený vďaka svojej praktickej stránke. Ak záťaž počas stavu spánku nespotrebuje všetku dodávanú energiu, tak prebytočná energia môže byť uskladnená a využitá neskôr, počas stavu činnosti. Takto napájaná záťaž môže počas stavu činnosti spotrebovať viac energie, ako je generátor schopný dodať. Potrebnú energiu dodá obvodu uskladnená energia. Pri nedostatku vibrácií nie je ohrozená funkčnosť, až po vyčerpanie uskladnenej energie[2].

Zariadenie na zber vibrácií zo svojho prostredia môžeme popísať ako bloky znázornené na Obr. 1 Týmto blokom sa budeme ďalej venovať v nasledujúcich kapitolách a podkapitolách.



Obr. 1 Bloková schéma zariadenia na zber energie z vibrácií [3]

1.1 Zdroje vibrácií

Premena vibrácií na elektrickú energiu nie je vhodná pre všetky prostredia. Preto je dôležité zamerať sa na prostredia, ktoré sú svojim charakterom vhodné pre ich zber. Takéto prostredia sú domácnosti, kancelárie, výrobné haly a iné. V Tab. 1 sú uvedené možné zdroje vibrácií v domácnosti spoločne s ich parametrami.

Zdroje vibrácií	Špičková hodnota zrýchlenia (m/s^2)	Maximálna frekvencia(Hz)
Kuchynský mixér	6,4	121
Sušička	3,5	121
Zárubňa pri zatváraní dverí	3.0	125
Mikrovlnná rúra	2,3	121
Notebook počas čítania CD-ROM	0,6	75
Práčka	0,5	109

Tab. 1: Zoznam možných zdrojov vibrácií v domácnosti [2]

Ďalším možným zdrojom je ľudská činnosť, kde ako pasívny produkt vznikajú vibrácie. Pod týmto môžeme chápať napríklad chôdzu, písanie na klávesnici alebo dýchanie. Ľudský pohyb je charakteristický svojou veľkou amplitúdou zrýchlenia a nízkou frekvenciou a preto je náročné navrhnuť miniatúrny generátor zberu energie pracujúci na ľudskom tele [4].

1.2 Typy generátorov

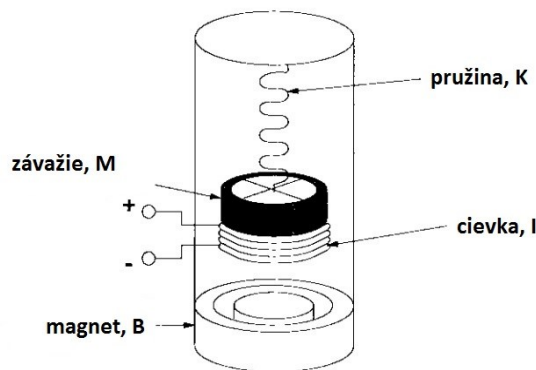
Základným prvkom pre získavanie el. energie z vibrácií je generátor. Generátor využíva rôzne spôsoby premeny vibračnej energie na elektrickú, a to buď: magnetickú indukciu (magnetický generátor), piezoelektrický jav (piezoelektrický generátor) a elektrostatickú indukciu (elektrostatický generátor).

Vibračný generátor pracuje na princípe rezonančného mechanizmu. Relatívny pohyb, spôsobený vibráciami, sa premení pomocou vyššie uvedených mechanizmov na elektrickú energiu. Základne prvky rezonančného mechanizmu sú hmotnosť m a tuhosť k na ktorú pôsobí celkové tlmenie b . Parametre sústavy rezonančného mechanizmu je potrebné nastaviť tak, aby bol naladený rezonančnou frekvenciou na charakter okolitých vibrácií, ktoré ho budú budiť.

1.2.1 Elektromagnetický generátor

Elektromagnetický generátor je založený na princípe elektromagnetickej indukcie, objavenej M. Faradayom v roku 1831. Ide o generovanie elektrického prúdu vo vodiči v blízkosti magnetického poľa. Množstvo elektromotorického napätia indukovaného na svorkách cievky závisí na rýchlosti zmeny magnetického poľa B a počte závitov cievky N [4].

Jedna z efektívnych metód zberu elektrickej energie z vibrácií je založená na elektromagnetickej indukcii, popísanou v rovnici (1.1) [2]. Magnet je pevne fixovaný v ráme, cievka spolu so závažím je pohyblivá, pripojená k jednému koncu pružiny zatiaľ čo druhý koniec je pevne fixovaný. Systém je znázornený na Obr. 2



Obr. 2: Elektromagnetický generátor, prevzaté z [5]

Preferovanejším spôsobom konštrukcie je s pohyblivým magnetom zaveseným na pružine. Takéto usporiadanie zabraňuje mechanickému namáhaniu elektrických spojov.

Pri konštrukcii treba dosiahnuť aby cievkou prechádzala čo najväčšia zmena magnetického toku Φ . Dôsledkom zmeny magnetického toku sa v uzavretom elektrickom obvode začne objavovať elektromotorické napätie U_i . [2]

$$U_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

Maximálne dosiahnuteľné napätie v otvorenom el. obvode U_{out} je popísané rovnicou (1.2).

$$U_{out} = NBl \frac{d\Delta}{dt} \quad (1.2)$$

Kde

N je počet závitov na cievke

B je magnetická indukcia

l predstavuje dĺžku vodiča v jednom závite

Δ je vzdialenosť ktorú prejde cievka v magnetickom poli

1.2.2 Piezoelektrický generátor

Piezoelektrický generátor funguje na princípe piezoelektrického javu, ktorý bol prvý krát popísaný v roku 1880 bratmi Curierovými. Pôsobením tlaku, ťahu, alebo ohybu sa kryštál deformuje. Kladné a záporne ióny zmenia svoje vzájomné vzdialenosti oproti pôvodnému stavu, čím v častiach kryštálu vznikne elektrický náboj[4].

Môžeme rozdeliť piezoelektrické štruktúry na:

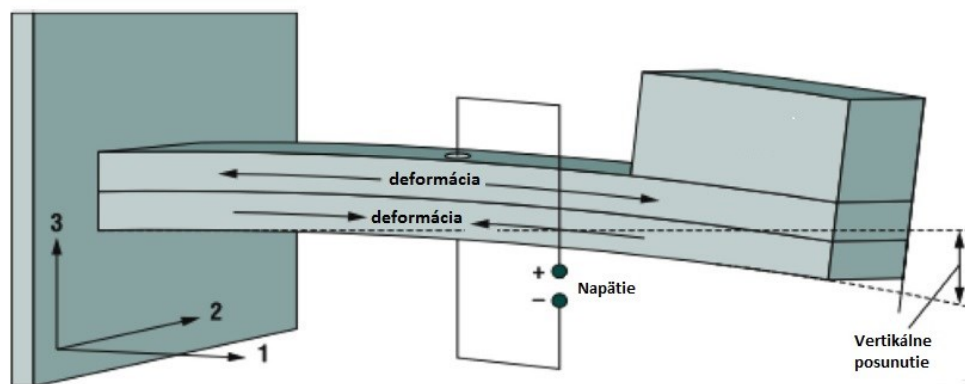
- Kryštalické (monokryštaly)
- Polykryštalické (piezoelektrická keramika)
- Organické polyméry (piezoelektrické polyméry)

Kryštalické	Polykryštalické	Organické polyméry
<ul style="list-style-type: none"> • Oxid kremičitý • Germanium bizmut • Triglycin sulfát 	<ul style="list-style-type: none"> • Zirkoničitan olovnatý • Titaničitan olovnatý • Olovozirkonat titanát 	<ul style="list-style-type: none"> • Polyvinylchlorid • Polyvinylfluorid • Difluorpolyetylén

Tab. 2 Prehľad piezoelektrických štruktúr

Schopnosť materiálu premeniť mechanickú energiu na elektrickú a naopak popisuje väzbový súčiniteľ. S napätím elektrického poľa súvisí piezoelektrický súčiniteľ napätia. Materiály s vysokým väzbovým súčiniteľom majú vyšší potenciál na premenu energie. Dôležitým parametrom je aj permitivita materiálu ktorá ovplyvňuje vnútornú impedanciu generátora [6].

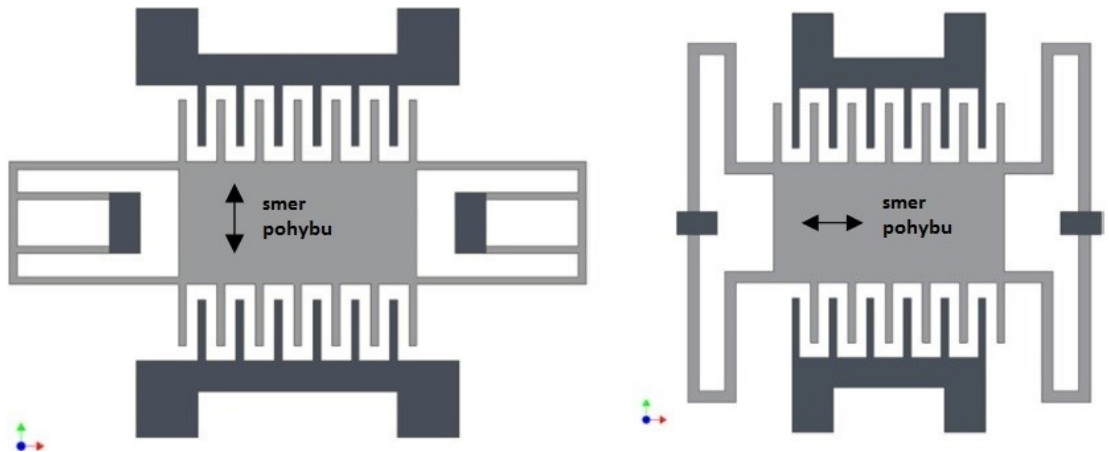
Najčastejšie používané deformácie piezoelektrického materiálu sú v ťahu a v tlaku. V prípade deformácie v ťahu mód 31 sú vyvinuté materiály ktoré sú odolné voči lomu pri ohybe. Najčastejšie sa používa materiál bimorph, ktorý sa skladá z dvoch tenkých vrstiev spojených do jedného celku. Pri vertikálnom posunutí sa spodná vrstva stláča zatiaľ čo vrchná sa roztahuje Obr. 3. Takto vzniká v každej deformovanej vrstve piezoelektrické napätie [2].



Obr. 3: Príklad piezoelektrického generátora v móde 31, prevzaté z [6]

1.2.3 Elektrostatický generátor

Generátor je tvorený dvomi elektródami z ktorých je jedna statická a druhá je pohyblivá. Medzi elektródami je dielektrikum. Takto vzniknutá štruktúra vytvára kondenzátor. Ak sú dosky v pokoji, veľkosť náboja je konštantný. Zvyšuje sa kapacitný odpor a narastá napätie na elektródach. Pôsobením vonkajšej sily na generátor sa pohyblivá elektróda vychýli, čím sa zmení veľkosť náboja. Reaktancia sa znižuje a nastáva pokles napätia.[4]



Obr. 4: MEMS štruktúra elektrostatického generátora, prevzaté z [4]

Na ilustráciu funkčnosti elektrostatického generátora môžeme použiť elementárny kondenzátor. Napätie na kondenzátore je popísané rovnicou (1.3)

$$U = \frac{Qd_e}{\varepsilon_0 l_e w_e}, \quad (1.3)$$

Kde

Q je náboj na elektródach

d_e je medzera alebo vzdialenosť medzi elektródami

l_e je dĺžka elektródy

w_e je šírka elektródy

ε_0 je permitivita vzduchovej medzery medzi elektródami

Kapacitu kondenzátora môžeme popísať rovnicou (1.4)

$$C = \varepsilon_0 \frac{l_e w_e}{d_e}. \quad (1.4)$$

1.2.4 Porovnanie generátorov

Vyššie popísané systémy generátorov majú svoje klady a zápory. Elektromagnetický generátor je vhodný pri vysokých úrovniach vibrácií kde je možnosť zberu vyšších výkonov. Výstupné napätie ale dosahuje nižšie úrovne v porovnaní s piezoelektrickým generátorom [7].

Elektrostatický generátor je vhodný svojim princípom na napájanie MEMS zariadení. Nevýhodou sú samostatný zdroj napätia pre inicializáciu premeny energie a nízky výstupný výkon [4].

Piezoelektrický generátor je vhodný na zber vibrácií v širokom pásme frekvencií 100Hz až desiatky kHz. Ďalším plusom je vysoké generované napätie ako aj vyššia praktická koncentrácia energie oproti menovaným systémom [2]. Nevýhodou takéhoto systému je vysoký vnútorný odpor [4].

Princíp generátora	Maximálna hustota energie
Elektromagnetická indukcia	400 mJ/cm ³
Elektrostatická premena	44 mJ/cm ³
Piezoelektrický jav	335 mJ/cm ³

Tab. 3 Maximálne dosiahnuteľné hodnoty energie[4]

1.3 Dostupnosť generátorov

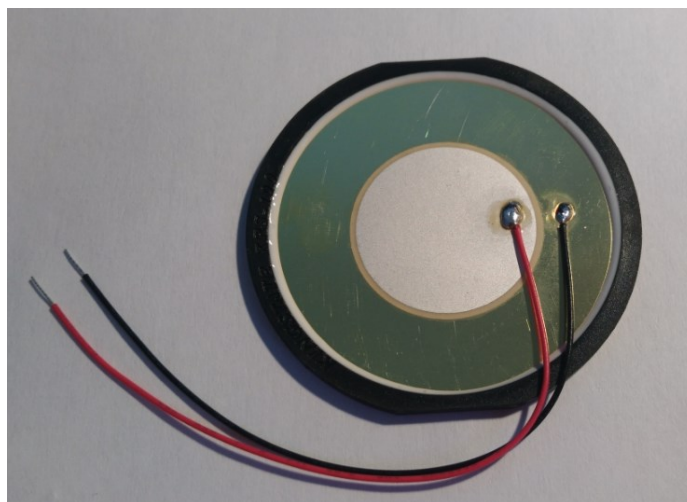
Pre aplikáciu demonštračného zariadenia je najvýhodnejší typ generátora založenom na piezoelektrickom jave. V súčasnej dobe ako jediný výrobca spoločnosť MIDE Technology Corporation ponúka svoje moduly u distribútorov el. súčiastok (Digi-Key a Mouser). Ostatní výrobcovia ponúkajú svoje produkty len na svojich oficiálnych stránkach a ich cena rapídne klesá s kúpeným množstvom.

Advanced Cerametrics	www.advancedcerametrics.com
Piezo Systems	www.piezo.com
Pi (Physink Instrumente)	www.pi-usa.us
MIDE Technology Corporation	www.mide.com
Measurement Specialties	www.means-spec.com
Morgan Technical Ceramics	www.morganelectroceramics.com

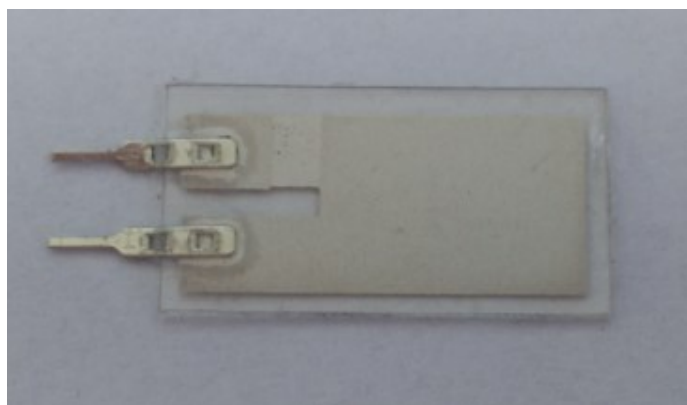
Tab. 4 Najväčší výrobcovia piezoelektrických generátorov

2 VÝBER A LADENIE GENERÁTORA

Pre demonštráciu možnosti zberu elektrickej energie z vibrácií je použitie piezoelektrických generátorov určených pre priemyselné nasadenie cenovo nevýhodné. Cena v jednotkových množstvách niekoľko násobne presahuje odhadovanú cenu zariadenia 1000Kč. Z tohto dôvodu bol vybraný cenovo dostupnejší piezoelektrický element a merací piezoelektrické filmový senzor.



Obr. 5 KINGSTATE KPSG-100

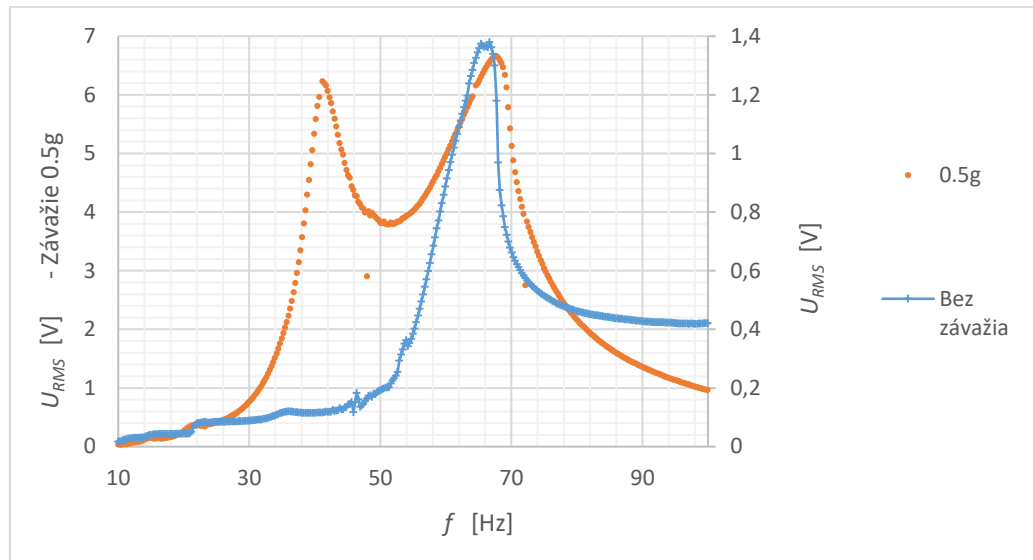


Obr. 6 Pro-Wave FS-2513P

Pre určenie či daný typ meniča je vhodný pre zber elektrickej energie z vibrácií, sme merali aké výstupné napätie a výkon môžeme získať z meniča, ak ho vystavíme vibráciám v blízkosti rezonančnej frekvencie.

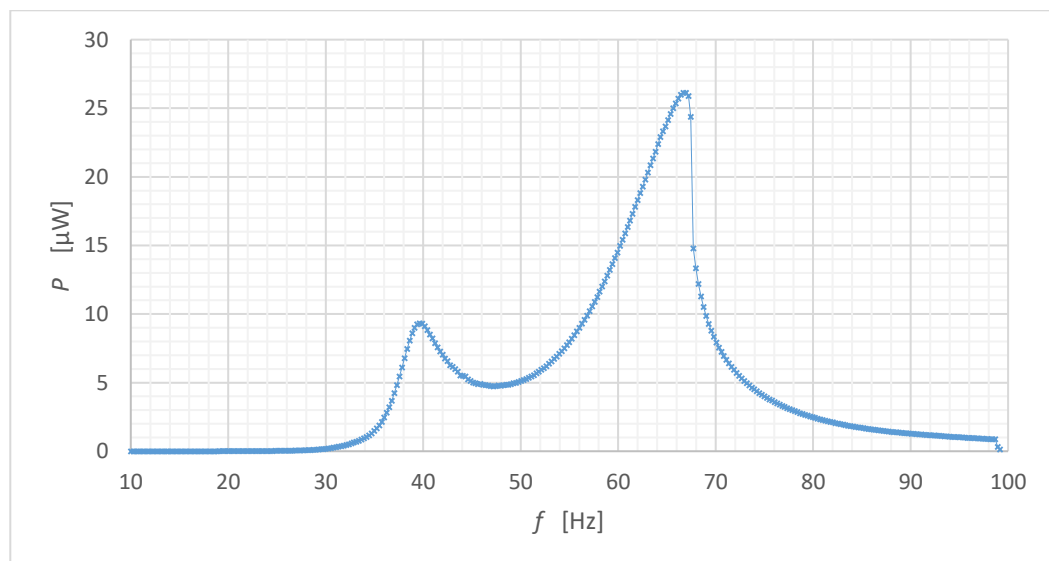
2.1 Piezoelektrický filmový senzor Pro-Wave FS-2513P

Piezoelektrický filmový senzor FS-2513P sa využíva primárne ako senzor vibrácií a detektor pohybu. Jeho rezonančná frekvencia je podľa katalógového listu 70-90Hz [8]. Ako piezoelektrický materiál je použitý polymérový film PVF2 – polyvinylidén fluoride. Pre svoju ohybnosť sa jedná skoro o ideálny snímací materiál na premenu mechanickej energie na elektrickú.



Obr. 7 Zmena výstupného napätia naprázdno FS-2513P

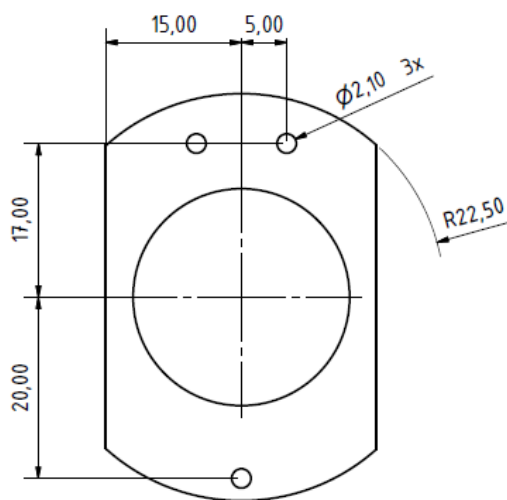
Pridaním závažia o hmotnosti 0,5 g na kmitajúci koniec piezoelektrického senzora sa zvýšilo výstupné napätie v rezonancii z 1,36V na 6,2V a znížila sa rezonančná frekvencia.



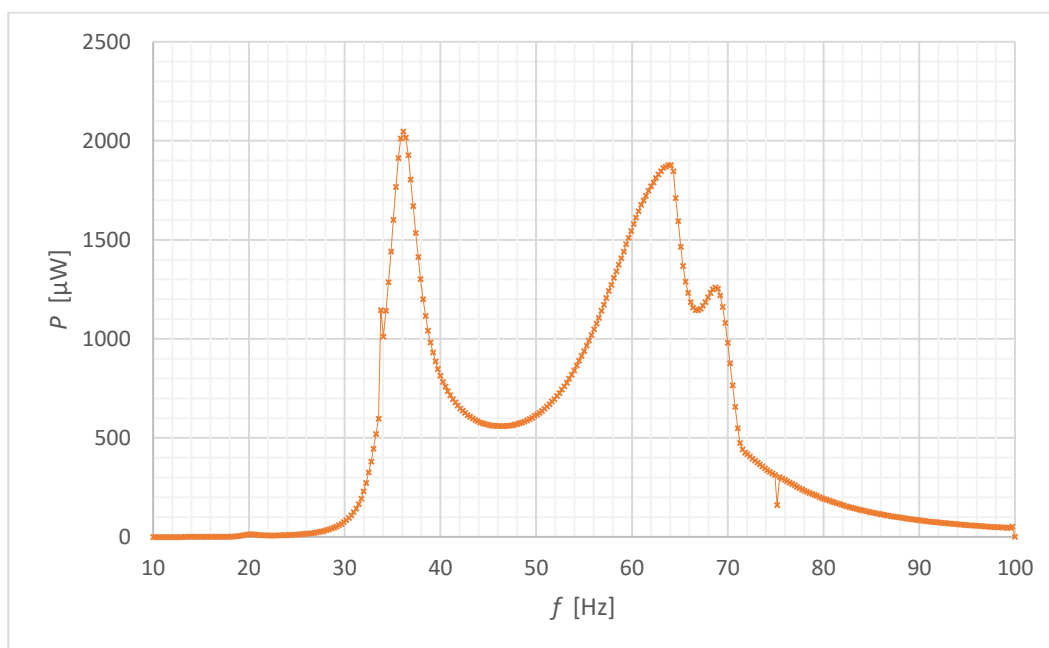
Obr. 8 Výstupný výkon FS-2513P do záťaže 50kΩ a závaží 0,5 g

2.2 Piezoelektrický menič KINGSTATE KPSG-100

Ide o samostatný piezoelektrický element bez budiča ktorý sa využíva na ozvučenie v rôznych aplikáciách. Ako piezoelektrický materiál je použitý olovo-zirkonát-titanátu (PZT). Udávaná rezonančná frekvencia v katalógovom liste je 1,2KHz. Keďže tento piezoelektrický element je zčasti zapuzdrený do plastového prstenca bol tento prstenec odstránený. Rovnako boli zmenené aj rozmery mosadzného plechu na ktorom je nanosená piezoelektrická keramika a slúži ako akustická membrána. Týmto úpravami sa docielilo, že jeden koniec meniča bude môcť oscilovať s väčšou amplitúdou než bolo výrobcom zamýšľané a rovnako sa zmenila aj rezonančná frekvencia meniča.



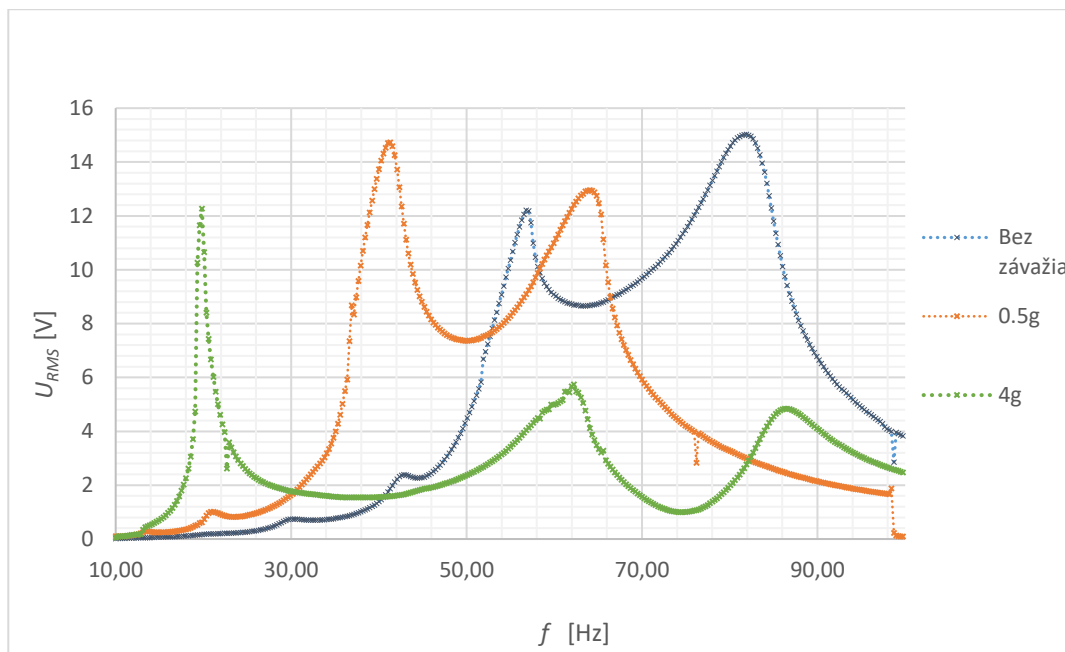
Obr. 9 Finálne rozmery meniča KPSG-100



Obr. 10 Výstupný výkon KPSG-100 do záťaže 50 kΩ a závaží 0,5 g

2.3 Ladenie rezonančnej frekvencie

Ladenie generátora prebieha pomocou pridania závažia. Závažie má za následok zmenu rezonančnej frekvencie smerom nadol. Tento proces je najkritickejší, od neho závisí veľkosť výstupnej energie. Jeho cieľom je sa čo najbližšie priblížiť frekvencií vibrácií, ktoré chceme premeniť na elektrickú energiu.



Obr. 11 Zmena rezonančnej frekvencie generátora KINGSTATE KPSG-100

3 INTEGROVANÉ OBVODY PRE ZBER ENERGIE

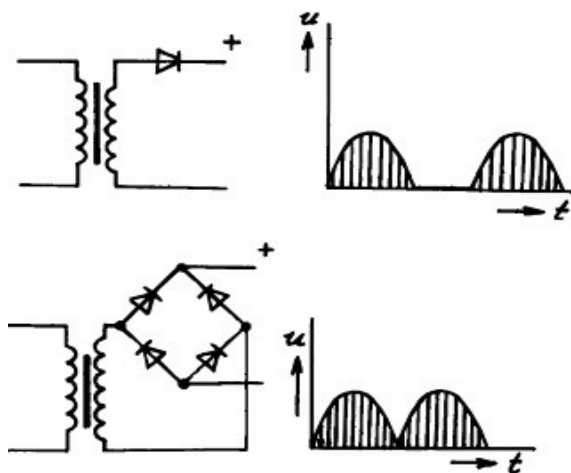
Na trhu sa v posledných rokoch objavili rôzne typy integrovaných obvodov, ktoré sú určené pre zber energie. Ich obrovská výhoda je minimálna vlastná spotreba a integrácia napäťového usmerňovača, zvyšujúceho/znižujúceho meniča, prípadne nabíjacieho obvodu a ochrany batérií do jedného puzdra neprevyšujúce rozmery 1 cm².

3.1 Usmerňovač

Generátory založené na elektro-magnetickej indukcii a piezoelektrickom efekte generujú striedavé napätie, ktoré je potrebné pre ďalšie využitie usmerniť. Na usmernenie sa využívajú neriadené jednofázové usmerňovače, ktoré sú čisto pasívne a nepotrebnú pre svoju činnosť ďalší zdroj energie.

3.1.1 Jednocestný usmerňovač

Najjednoduchšie riešenie je usmernenie pomocou jednej polovodičovej diódy Obr. 12a. Takéto riešenie sa nazýva jednocestné, v obvode je zapojená iba jedna usmerňovacia cesta. V tomto zapojení sa dióda chová ako ventil, kedy kladná polovlna je prepustená ďalej do obvodu a záporná polovlna je zadržaná.



Obr. 12 a) jednocestný usmerňovač, b) mostíkový dvojcestný usmerňovač

3.1.2 Dvojcestný mostíkový usmerňovač

Pri dvojcestnom usmernení Obr. 12b nám kladná polovlna napätia prechádza dvomi kladne orientovanými diódami, záporná polovlna dvomi záporne orientovanými diódami. Mostíkové dvojcestné zapojenie nám obracia zápornú polovlnu, tým získané napätie, má dva krát menšiu periódu.

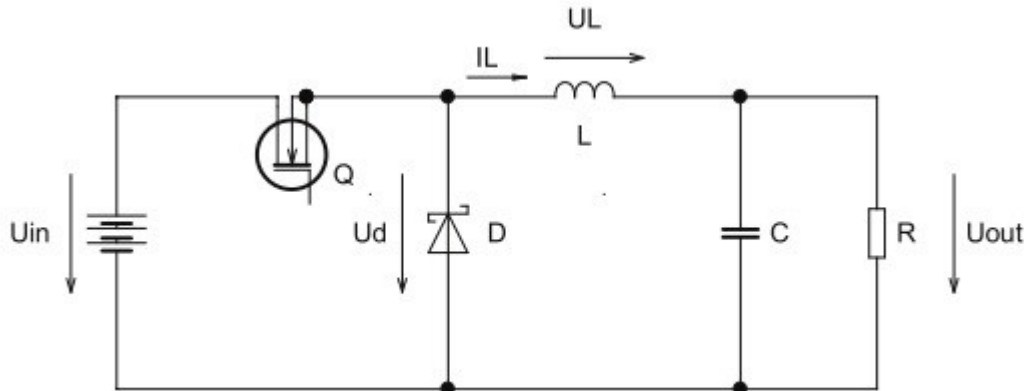
Ako je na Obr. 12 viditeľné takto vzniknuté pulzujúce napätie má vysoké zvlnenie, ktoré odstránime pridaním vhodného kondenzátora, zapojeného paralelne k výstupu usmerňovača.

3.2 Menič DC/DC

Menič DC/DC slúži na prevod napätia medzi jednosmernými napájacími sústavami. V obvodoch pre zber energie sa najčastejšie vyskytujú dva druhy meničov. Pre napájanie z piezoelektrického generátora sa používa Buck-menič (znižujúci menič), keď že výstupné napätie piezoelektrického meniča dosahuje napätia vyššie ako požadované napájacie napätie. Pre moderné mikroprocesory je to 1,2V až 3,3V. Pri napájaní z elektromagnetického generátora sa využíva Boost-menič (zvyšujúci menič).

3.2.1 Menič typu Buck

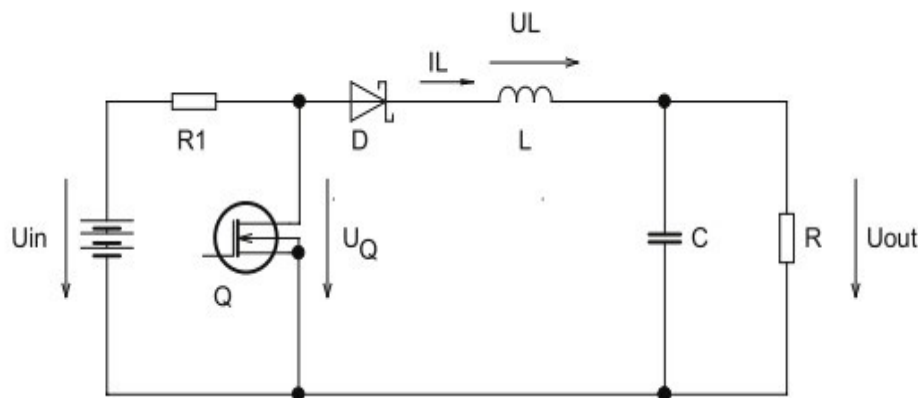
Buck, znižujúci menič, zaraďujeme medzi spínané meniče. Jeho funkčnosť môžeme popísať dvoma režimami, a to keď je spínací prvok zopnutý / rozopnutý.



Obr. 13 Základné zapojenie meniča typu Buck, prevzaté z[9]

Pokiaľ je spínací prvok, tranzistor Q , zopnutý, je obvod napájaný rovno zo zdroja a prúd tečie cez cievku L . Zároveň sa v tomto režime cievka chová ako spotrebič a je na nej úbytok napätia U_L . Kondenzátor C sa nabíja prúdom I_C a napätie U_C sa zvyšuje. Veľkosť výstupného napätia U_{out} nemôže dosiahnuť maxima vstupného napätia U_{in} .

Úpravou schémy podľa Obr. 14 sa zbavíme plávajúceho zapojenia tranzistora Q . Jediná zmena oproti základnému zapojeniu Obr. 13 je invertovaná spínacia logika[9], [10].



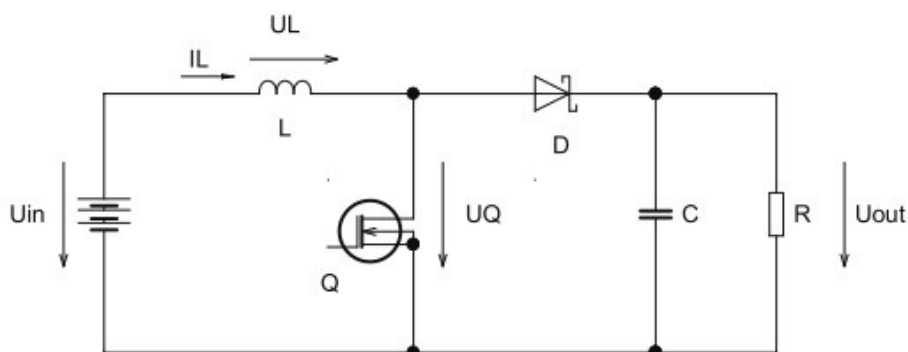
Obr. 14 Menič typu Buck- upravené zapojenie, prevzaté z [9]

3.2.2 Menič typu Boost

Menič typu Boost, zvyšujúci menič, zaraďujeme rovnako ako Buck medzi spínané meniče. A rovnako ho môžeme popísať dvomi režimami, keď je spínací prvok zapnutý a keď je rozopnutý.

Ak je spínací tranzistor Q zapnutý, cievka L sa chová ako spotrebič a dióda D je polarizovaná v závernom smere. Celkový prúd do záťaže je odoberaný z kondenzátora C a jeho vybíjaním klesá výstupné napätie U_{out} .

Pri rozopnutom spínacom tranzistore Q sa cievka bráni zmene napätia a začína sa chovať ako zdroj. Dôsledkom tohto stavu sa zachováva smer prúdu I_L , ale polarita napätia sa mení. Napätie na tranzistore U_Q je súčtom napätia U_{in} a napätia na cievke U_L . Dióda D je polarizovaná v priepustnom smere, následkom čoho je kondenzátor nabíjaný prúdom I_C a jeho napätie stúpa rovnako ako výstupné napätie U_{out} [9].

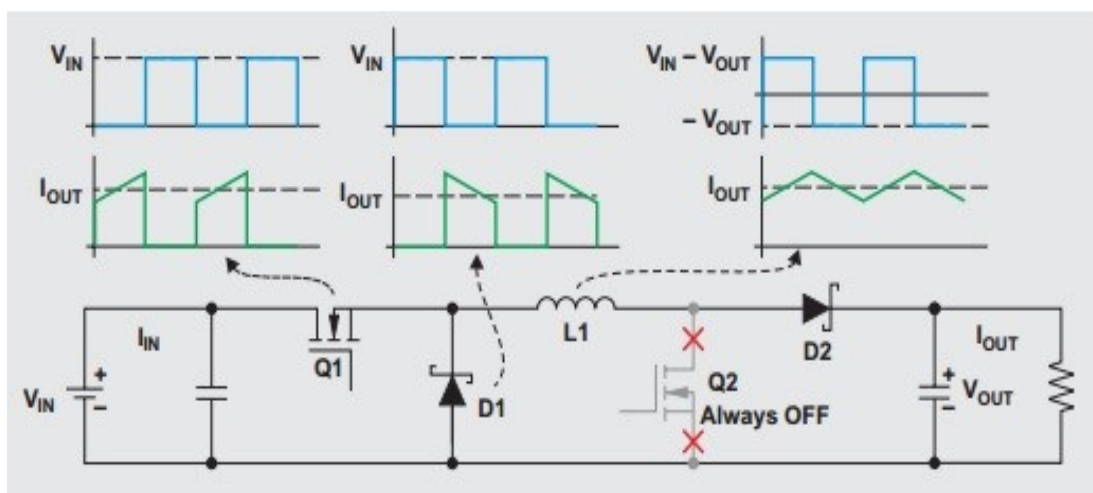


Obr. 15 Menič typu Boost, prevzaté z [9]

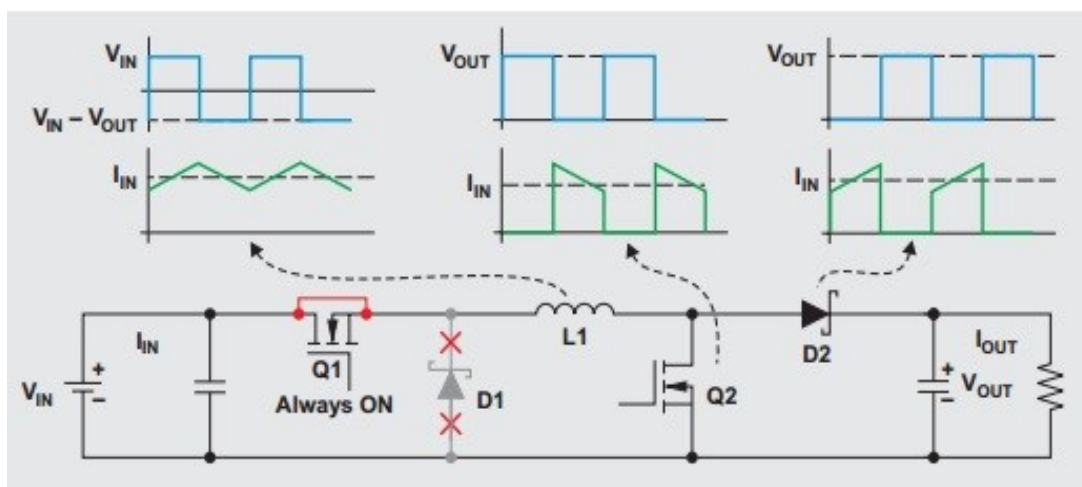
3.2.3 Menič typu Buck-Boost

Spojením predchádzajúcich dvoch typov meničov, môžeme docieľiť, že vstupné napätie U_{in} môže byť menšie ako výstupné U_{out} , alebo väčšie ako výstupné U_{out} . Meniče typu Buck-Boost sa najčastejšie využívajú v aplikáciách, ktoré sú napájané batériou. Pri nabití batérií menič pracuje v móde Buck a ako sa batéria postupne vybíja, menič sa prepne do módu Boost.

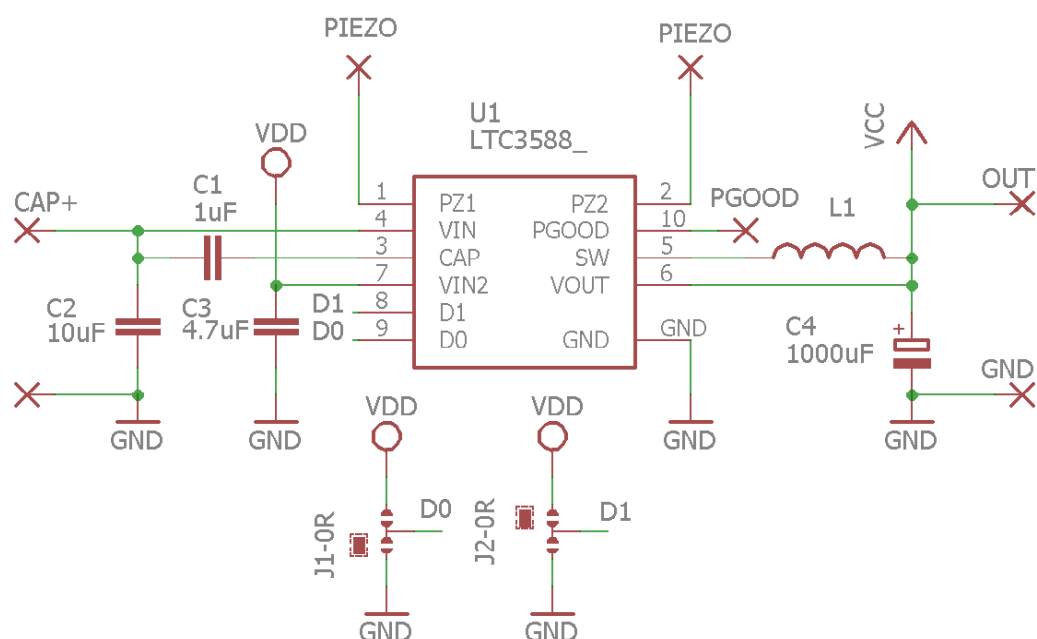
Pri použití základného zapojenia Buck-Boost meniča sa invertuje napätie na výstupe oproti nule čo je vo viacerých aplikáciách neželané. Buck-Boost menič s dvoma spínačmi Obr. 16 a Obr. 17 neinvertuje výstupné napätie. Pri tomto zapojení sú kladené vyššie nároky na presnosť ovládacej logiky spínačov. Napätie na vstupe sa musí kontinuálne kontrolovať aby sa menič mohol prepnúť do správneho módu, čím sa zabezpečí vysoká účinnosť meniča [11].



Obr. 16 Buck-Boost menič s dvoma spínačmi v Buck móde, prevzaté z [11]



Obr. 17 Buck-Boost menič s dvoma spínačmi v Boost móde, prevzaté z [11]



Obr. 19 Testovacie zapojenie

D_1	D_0	V_{out}
0	0	1,8V
0	1	2,5V
1	0	3,3V
1	1	3,6V

Tab. 5 Nastavenie výstupného napätia

Ak napätie na C_2 neprekročí spínaciu hodnotu DC/DC menič ostáva vo vypnutom stave. Ak napätie piezogenerátora prekročí spínaciu hodnotu menič začne postupne odoberať energiu z kondenzátora C_2 do výstupného kondenzátora C_4 . Po dosiahnutí zvoleného výstupného napätia DC/DC menič sa automaticky vypne .

V_{out}	V_{in} zapínacie.	V_{in} vypínacie.
1,8V	4,04V	2,87V
2,5V	4,04V	2,87V
3,3V	5,05V	3,67V
3,6V	5,05V	4,02V

Tab. 6 Prehľad možných výstupných napätí

Pre výpočet veľkosti kondenzátora C_4 bude použitý vzorec (4.1) do ktorého je potreba zadať prúd odoberaný do záťaže I_{LOAD} , priemerný prúd odoberaný DC/DC meničom I_{BUCK} , čas pripojenia záťaže t_{LOAD} , minimálne a maximálne napätie na záťaži U_{MIN} a U_{MAX} [12].

$$C_4 = (I_{LOAD} - I_{BUCK}) \times \frac{t_{LOAD}}{U_{MAX} - U_{MIN}} \quad (4.1)$$

Keď ani jednu z premenných hodnôt dopredu nepoznáme, pokiaľ nebudeme mať navrhnutý obvod merania teploty a vlhkosti, veľkosť kondenzátora C_4 pre potreby prvotného merania odhadneme pomocou výpočtu (4.3).

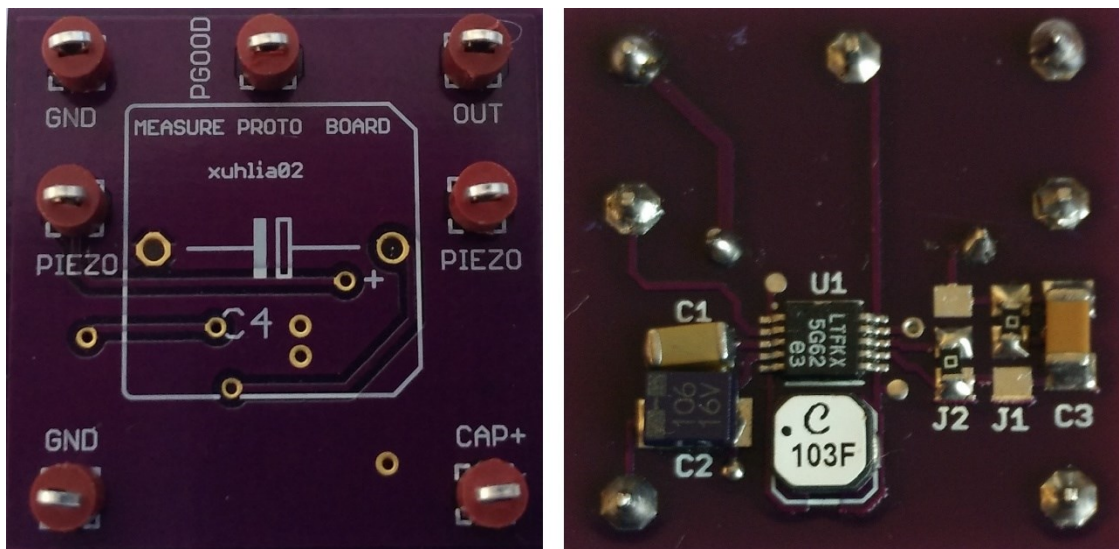
Moderné mikrokontrolery potrebujú okolo $150\mu A/MHz$ a maximálne výstupné napätie z LTC 3588 je 3,6 V, na prečítanie teploty a vlhkosti nám bude potreba odhadom 10 s.

$$E = U_{MAX} \times I_{LOAD} \times t_{LOAD} = 3,6 V \times 150\mu A \times 10 s = 5,4 mJ \quad (4.2)$$

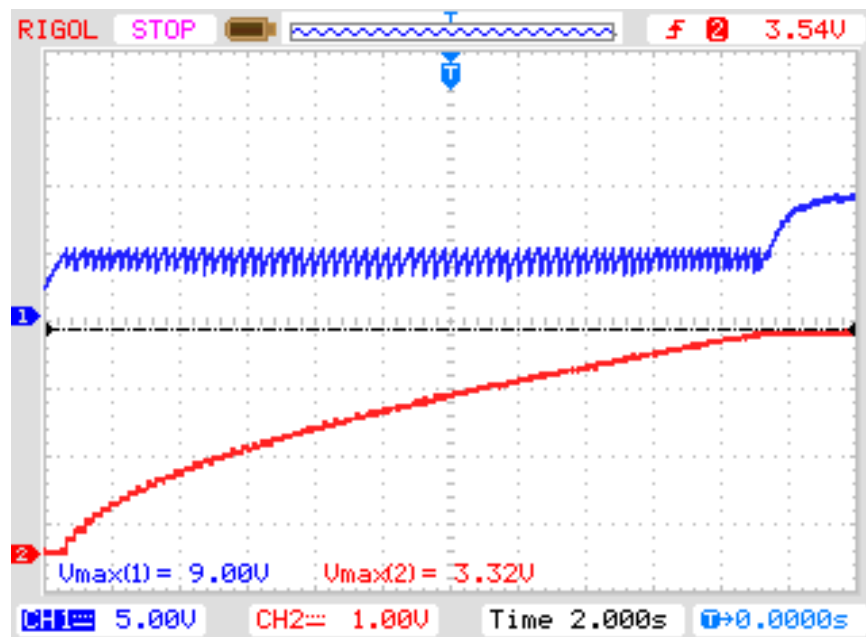
$$E = \frac{1}{2} C \times U = \frac{1}{2} C \times 3,6^2 \rightarrow C = 833\mu F \quad (4.3)$$

Výslednú odhadovanú kapacitu kondenzátora C_4 po zaokrúhlení zvolíme $1000\mu F$.

Pre potreby merania bola na základe schémy znázornenej na Obr. 19 vytvorená samostatná DPS na ktorej bolo realizované prvotné meranie.



Obr. 20 DPS pre potreby merania

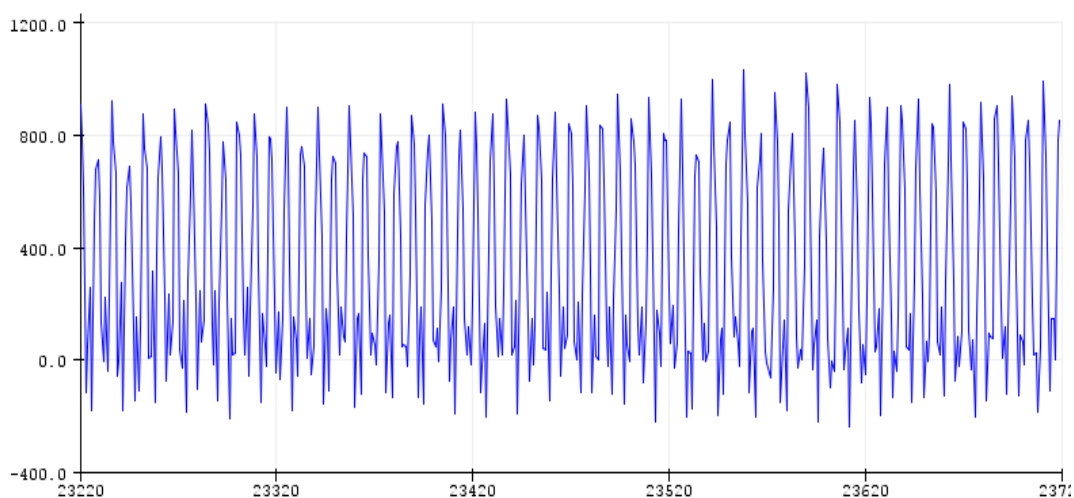


Obr. 21 Priebeh nabíjania C_2 -modrá C_4 -červená

Meraním sme určili, že nabitie kondenzátora C_4 pomocou KINGSTATE KPSG-100 na napätie 3,3 V trvá 21 sekúnd. Kde meranie bolo realizované pri úrovni vibrácií max. $1,1 \text{ m/s}^2$ a rezonančnej frekvencií 77 Hz.

Meranie úrovne vibrácií prebiehalo za pomoci 3 osého akcelerometra MPU6050 pripojeného cez rozhranie TWI k vývojovej platforme Arduino, kde namerané hodnoty boli vykresľované pomocou sériového zapisovača, ktorý je súčasťou IDE Arduino.

Pri použití FS-2513P sa pri rezonančnej frekvencií 67 Hz nepodarilo nabiť kondenzátor C_2 o veľkosti $1 \mu\text{F}$ na napätie 5 V, čo je minimálne napätie pre spustenie DC/DC meniča, ktorý odčerpá energiu do kondenzátora C_4 . Z tohto dôvodu sme používali len menič KINGSTATE KPSG-100, ktorý nám poskytoval dostatočné výstupné napätie.



Obr. 22 Meranie vibrácií pomocou MPU6050

4.2 Číslicová časť

Nízka spotreba v režime Shut-down je jedna z kľúčových vlastností pri ktorých sa prihliadalo vo výbere vhodného mikrokontrolera. Predpokladá sa, že počas nabíjania kondenzátora C_4 bude mikrokontrolér v režime hlbokého spánku. Po splnení podmienky, že je kondenzátor C_4 nabitý na požadované napätie a užívateľ chce spustiť samotné meranie, sa mikrokontrolér zobudí do aktívneho režimu.

Ako riadiaci mikrokontrolér bol zvolený MSP430FR6989 od spoločnosti Texas Instruments. Ide o 16-bit RISC mikrokontrolér založený na jadre MSP430FR s maximálnou frekvenciou 16 MHz. Napájacie napätie je v rozsahu 1,8 V až 3,6 V [13].

Mikrokontrolér sa vyznačuje spotrebou:

- 100 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ v aktívnom režime
- 0,4 μA v režime Standby
- 0,02 μA v režime Shut-down

Mikrokontrolér disponuje siedmimi nízko príkonovými režimami. Dáta sú uložené v pamäti typu FRAM o veľkosti 128KB a 2KB SRAM. Jedným z množstva výhod je aj integrovaný budič segmentových LCD, ktorý je využitý v aplikácií na zobrazenie teploty a vlhkosti okolitého vzduchu.

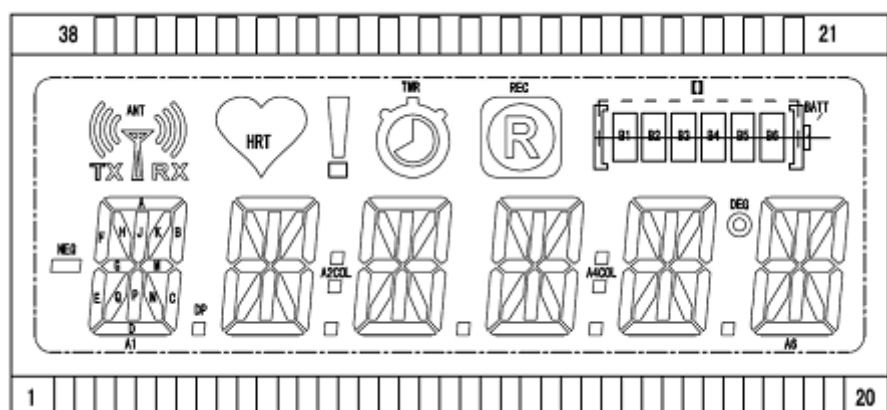
Zapojenie číslicovej časti je umiestnené na samostatnej doske plošného spoja, ktorá sa pripája k ostatným častiam pomocou dvadsať pinového konektora X1 typu FFC/ZIF. Takéto riešenie umožňuje zmenšiť rozmery aplikácie skladaným DPS, za alebo vedľa seba. Ďalšia výhoda je aj väčšia voľnosť pri návrhu krabíčky do ktorej bude zariadenie umiestnené.

Na konektor X1 a X2 sú vyvedené:

- Napájanie
- Spy-Bi-Wire (programovanie/ladenie)
- SPI
- UART
- I²C
- P1.0 až P1.3
- P2.4 až P2.7

Zapojenie číslicovej časti a pripojenie k okolitému svetu pomocou X1 a X2 konektoru umožňuje neskoršie rozšírenie pomocou modulov. Moduly následne môžu komunikovať cez I²C alebo SPI

Na doske číslicovej časti je okrem mikrokontrolera a podporných obvodov umiestnený aj LCD na ktorom budú zobrazované namerané hodnoty teploty.



Obr. 23 HF-1138P segmentové LCD prevzaté z [14]

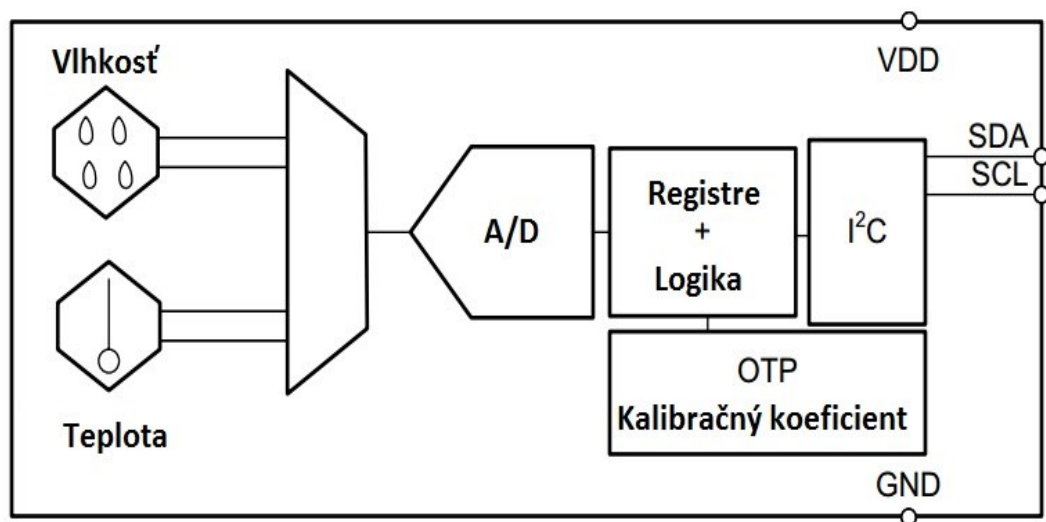
Použitý LCD FH-1138P spoločnosti Adkom Elektronik GmbH sa skladá zo šiestich 14segmentových digitov a špeciálnych znakov, ktoré sú všetky znázornené na Obr. 23. Samotný LCD bude osadený do päťice, ktorá umožňuje výmenu LCD v prípade jeho poškodenia.

4.3 Meranie teploty a vlhkosti

Meranie teploty a vlhkosti má na starosti integrovaný obvod HDC1080 od spoločnosti Texas Instruments. Jedná sa o digitálny senzor s veľmi nízkou spotrebou a kalibráciou od výrobcu, ktorý je určený pre široký rozsah aplikácií

Hlavné parametre snímača HDC1080

- Presnosť merania teploty $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
- Presnosť merania vlhkosti $\pm 2\%$
- 14bit rozlíšenie merania
- Spotreba v spánku 100 nA
- Rozsah napájacieho napätia 2,7V - 5,5V



Obr. 24 Bloková schéma HDC1080[15]

Obvod komunikuje s MCU pomocou zbernice I²C, cez ktorú MCU vyčíta namerané hodnoty teploty a vlhkosti z príslušných registrov senzora. Rozlíšenie presnosti merania vlhkosti môže byť zvolená medzi 8, 11 alebo 14 bitmi a rozlíšenie teploty medzi 11 alebo 14 bitmi. Tieto nastavenia sa vykonávajú pomocou programu v MCU. V aplikácií je využívané 14b rozlíšenie pre teplotu aj vlhkosť.

4.3.1 Výpočet teploty

Register teploty má rozsah 16 bitov, posledné dva bity sú vždy logická 0. Teplota sa vypočíta podľa nasledujúceho vzorca [15] :

$$Teplota [^{\circ}C] = \left(\frac{reg.teploty \{15:00\}}{2^{16}} \right) \times 165^{\circ}C - 40^{\circ}C \quad (4.4)$$

Príklad výpočtu teploty:

$$Teplota [^{\circ}C] = \left(\frac{26100}{2^{16}} \right) \times 165^{\circ}C - 40^{\circ}C \doteq 25,71^{\circ}C \quad (4.5)$$

4.3.2 Výpočet vlhkosti

Hodnota vlhkosti sa rovnako, ako v prípade teploty nachádza v 16 bitovom registri. Posledné dva bity majú vždy logickú hodnotu 0 [15] .

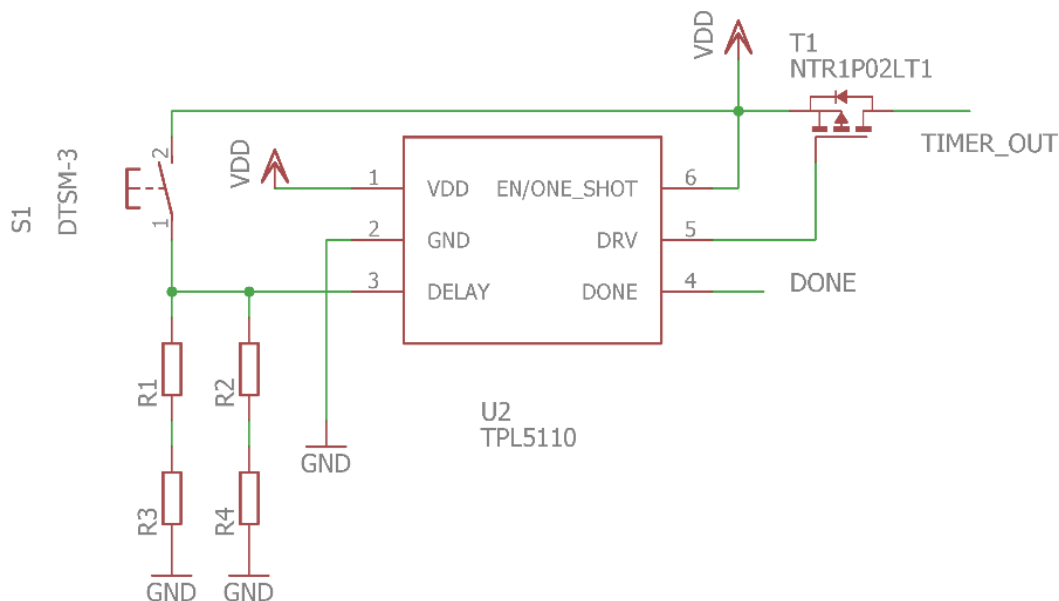
$$Relatívna vlhkosť [\%] = \left(\frac{reg.vlhkosti\{15:00\}}{2^{16}} \right) \times 100\% \quad (4.6)$$

Príklad výpočtu vlhkosti:

$$Relatívna vlhkosť [\%] = \left(\frac{24836}{2^{16}} \right) \times 100\% \doteq 37,89\% \quad (4.7)$$

4.4 Časovač

Pre možnosť opakovaného spúšťania v presne stanovenom čase bol z dôvodu extrémne nízkej spotreby 35nA [16] zvolený samostatný obvod časovača TPL5110, ktorý ovláda spínací tranzistor T1 v stanovenom čase, prípadne po zopnutí spínača S1. Spínací čas sa volí pomocou odporov R1 až R4. Za podmienky, že MCU vykonal všetky kroky programu, vyšle MCU signál DONE a obvod uzavrie spínací tranzistor T1.



Obr. 25 Schéma zapojenia časovača

Vzorec pre výpočet veľkosti celkového odporu R zloženého z R_1 až R_4

$$R = 100 \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a(c - 100T)}}{2a} \right) \quad (4.8)$$

$$R = \frac{(R_1 + R_3) \times (R_2 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (4.9)$$

Kde

T je čas v sekundách

R je veľkosť odporu v Ω

a, b, c sú koeficienty rozsahov podľa Tab. 7

Časový interval T [s]	a	b	c
$1 < T \leq 5$	0,2253	-20,7654	570,5679
$5 < T \leq 10$	-0,1284	46,9861	-2651,8889
$10 < T \leq 100$	0,1972	-19,3450	692,1201
$100 < T \leq 1000$	0,2617	-56,2407	5957,7934
$T > 1000$	0,3177	-136,2571	34522,4680

Tab. 7 Koefficienty pre vzorec (4.8)

T	Vypočítaná hodnota [k Ω]	Najbližšia reálna hodnota[k Ω]
1min	22,02	22,021
2min	29,35	29,349
3min	34,73	34,729
4min	39,11	39,097
5min	42,9	42,887
6min	46,29	46,301
7min	49,38	49,392
8min	52,24	52,224
9min	54,92	54,902
10min	57,44	57,437
20min	77,57	77,579
30min	92,43	92,233
40min	104,67	104,625
50min	115,33	115,331
1h	124,91	124,856
1h30min	149,39	149,398
2h	170	170

Tab. 8 Najčastejšie používané časové intervaly

5 OŽIVENIE A LADENIE

5.1 Vplyv programu na spotrebu

Aby sme sa mohli priblížiť udávanej teoretickej spotrebe MCU ako v aktívnom tak aj úspornom režime je potreba vhodne napísať riadiaci program, ktorý má extrémny vplyv na spotrebu MCU. Výsledný riadiaci program mikrokontroléra bol písaný za pomoci vývojového nástroja Code Composer studio 7. ktorého súčasťou je aj nadstavba Energy Trace++. V spolupráci s programátorom/debuggerom podporujúcim túto technológiu sme schopní merať aktuálnu spotrebu mikrokontroléra rovnako ako aj pripojených periférií.

MCU bez žiadnej optimalizácie riadiaceho programu	
Čas behu programu	300 sekúnd
Spotrebovaná energia	291,21mJ
Priemerná spotreba	0,9625mW
Maximálna spotreba	6,7951mW
Priemerný odoberaný prúd	0,2943mA
Maximálny odoberaný prúd	2,0761mA
Odhadovaná doba chodu na batériu CR2032	28,3 dňa

Tab. 9 Spotreba MCU bez optimalizácie programu

Meranie zobrazené v Tab. 9 prebiehalo po dobu 5 minút, kedy sme raz vyčítali teplotu a vlhkosť z čidla HDC1080 a zobrazili namerané hodnoty na LCD. Tento dej trval 5 sekúnd, zvyšných 295 sekúnd nevykonával mikrokontóler žiadnu činnosť.

Toto meranie prebiehalo na vývojovej doske LaunchPad MSP430FR4133 z ktorej sme použili programátor/debugger podporujúci technológiu Energy Trace. Vývojová doska bola pripojená k aplikácii pomocou testovacích bodov, ktoré sa nachádzajú na doske demonštračného zariadenia.

MCU s vypnutými vývodmi ktoré sa nepoužívajú v aplikácií	
Čas behu programu	300 sekúnd
Spotrebovaná energia	272,449mJ
Priemerná spotreba	0,9003mW
Maximálna spotreba	6,7020mW
Priemerný odoberaný prúd	0,2753mA
Maximálny odoberaný prúd	2,0483mA
Odhadovaná doba chodu na batériu CR2032	30,3 dňa

Tab. 10 Spotreba MCU s vypnutými nevyužitými vývodmi

MCU s vypnutými vývodmi ktoré sa nepoužívajú v aplikácií + režim shut down (LPM4.5)	
Čas behu programu	300 sekúnd
Spotrebovaná energia	3,377mJ
Priemerná spotreba	0,0138mW
Maximálna spotreba	6,5028mW
Priemerný odoberaný prúd	0,0042mA
Maximálny odoberaný prúd	1,9868mA
Odhadovaná doba chodu na batériu CR2032	2442,9 dňa

Tab. 11 Spotreba MCU s vypnutými nevyužitými vývodmi a zapnutým režimom shut-down

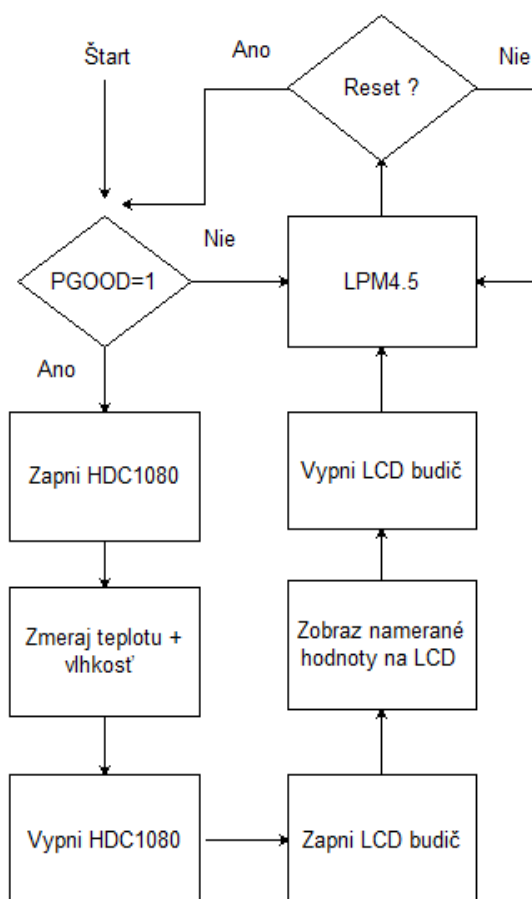
Ako je vidieť na Tab. 10 nastavením nevyužitých pinov, ako výstupných v logickej úrovni 0 sme docielili úsporu 18,761mJ v meranom intervale. Táto minimálna zmena kódu by nám pridala 2 dni činnosti pri napájaní aplikácie 3V batériou CR2032.

V Tab. 11 je znázornený vplyv zapnutia power-down režimu LPM4.5 po zobrazení nameraných hodnôt. Táto zmena oproti predošlým dvom prípadom má za následok úsporu v priemere 278.4 mJ energie. Ak by sme našu aplikáciu znova napájali 3 V batériou CR2032 tak by nám podľa odhadov batéria vydržala 6,5 roka.

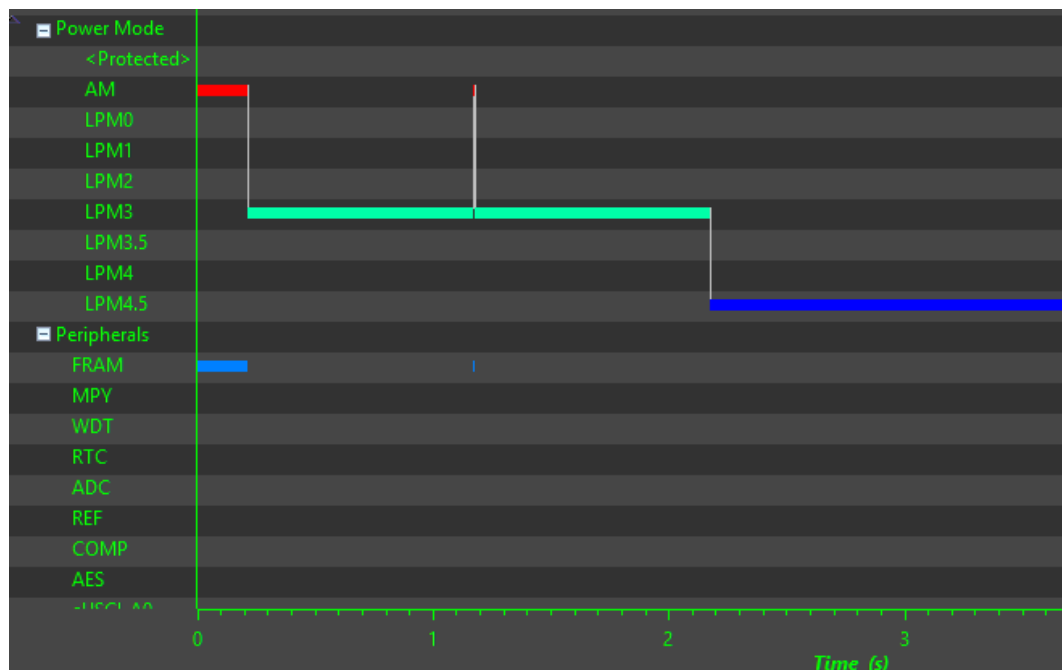
V predchádzajúcich prípadoch mikroprocesor počas zobrazenia hodnôt neprechádzal do stavu spánku čo má pomerne veľký vplyv na celkovú spotrebu zariadenia. Nahradením kódu, kde mikroprocesor iba čaká 2x po jednej sekunde na prečítanie nameranej hodnoty užívateľom, za režim spánku s prerušením sme znížili spotrebu zariadenia na 0,946mJ. Pri takejto nízkej spotrebe by zariadenie podľa odhadov programu Energy Trace vydržalo, pri napájaní batériou CR2032 okolo 23 rokov.

MCU s vypnutými vývodmi ktoré sa nepoužívajú v aplikácii , čakanie nahradené spánkom + režim shut down (LPM4.5)	
Čas behu programu	300 sekúnd
Spotrebovaná energia	0,946mJ
Priemerná spotreba	0,0043mW
Maximálna spotreba	1,9838mW
Priemerný odoberaný prúd	0,0013mA
Maximálny odoberaný prúd	0,6063mA
Odhadovaná doba chodu na batériu CR2032	8723,7 dňa

Tab. 12 Spotreba MCU s vypnutými nevyužitými vývodmi, nahradením čakania za spánok s prerušením a zapnutým režimom shut-down



Obr. 26 Výsledný priebeh programu



Obr. 27 Prepínanie napájacích režimov počas merania a zobrazenia

5.2 Výber kondenzátora pre uschovanie energie

Pomocou nemeraných hodnôt v aplikácii Energy Trace a následným ladením programu sme získali doposiaľ neznáme hodnoty, ktoré sme potrebovali dosadiť do vzorca (4.1).

Prúd do záťaže I_{LOAD} získame z veľkosti odoberanej energie, kde ako napätie dosadíme max napájacie napätie $U_{MAX} = 3,3V$. Ako minimálne napájacie napätie zvolíme hodnotu z katalógového listu mikroprocesora $U_{MIN} = 1,8 V$.

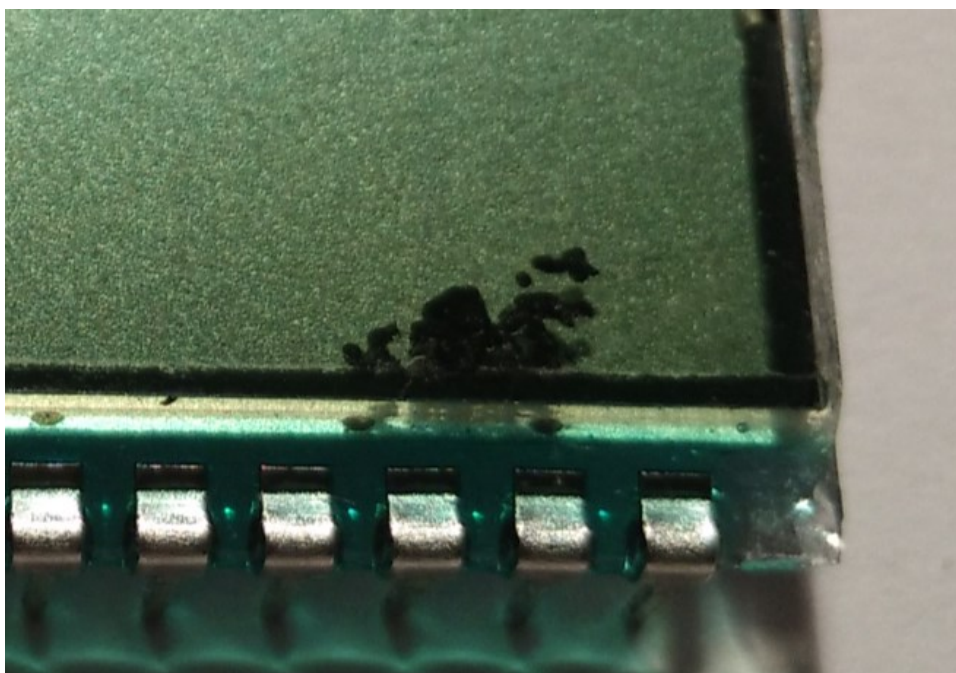
Príklad výpočtu :

$$C_4 = (0,28 - 0,14) \times \frac{2,2}{3,3 - 1,8} = 205 \mu F \quad 5.1$$

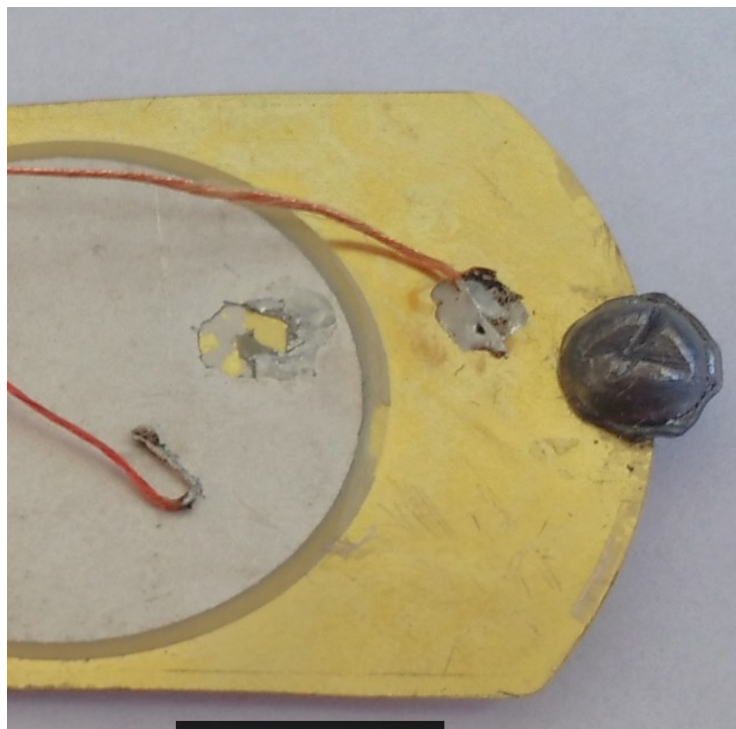
Výslednú hodnotu výpočtu sme zaokrúhlili na $220 \mu F$. V praxi nám takto zvolená veľkosť kondenzátora C4 zabezpečuje jedno zmeranie teploty a vlhkosti.

5.2.1 Pôsobenie vibrácií na elektroniku

Pri meraní sme sa stretávali s rôznymi formami poškodenia súčasti zostavy. Na použitom LCD sa prejavili vplyvom vibrácií praskliny medzi vrstvami skla. Poškodenie je zobrazené na Obr. 28. Vplyvom vibrácií sa začala oddeľovať keramická vrstva na meniči v mieste spájkovaného spoja, čo malo za následok postupné znemožnenie zberu energie. Z tohto dôvodu bol piezomenič vyňatý z krabičky tak aby bolo možné menič samostatne umiestniť na zdroj vibrácií a ostatnú elektroniku mimo, tak aby sa minimalizovali ďalšie mechanické poškodenia na LCD a DPS.

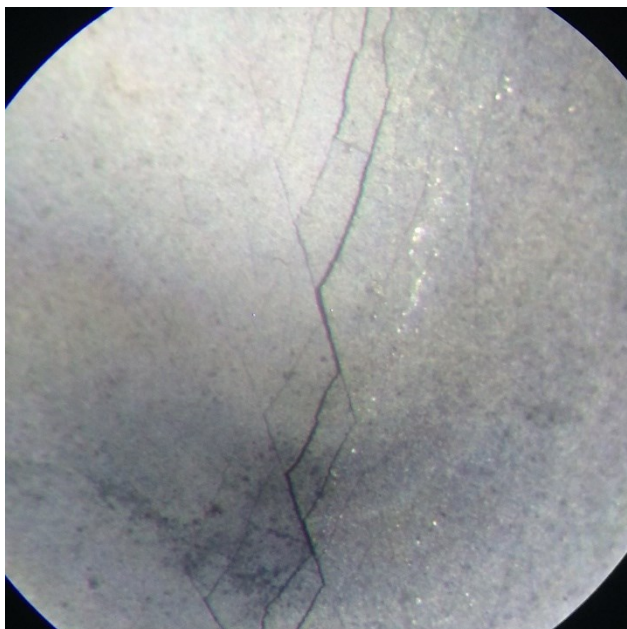


Obr. 28 Poškodené LCD následkom vibrácií



Obr. 29 Poškodenie meniča vibráciami

Následkom pôsobenia vibrácií na menič vznikajú v piezo keramickej hmote praskliny ktoré majú dopad na výstupný výkon piezo meniča a tým aj rýchlosť nabíjania kondenzátora C4 .



Obr. 30 Povrch meniča po 100 hodinách (77Hz 2 m/s^2 , zväčšenie mikroskopu $80\times$)

6 ZÁVER

V bakalárskej práci je popísaný spôsob zberu elektrickej energie z vibrácií a výber vhodného typu použitého generátora na premenu vibrácií na elektrickú energiu. Následne bol navrhnutý a realizovaný obvod napájacej časti demonštračného zariadenia v dvoch prevedeniach a obvod číslicovej časti, ktorý ma za úlohu vyčítanie dát z teplotného snímača a následné zobrazenie na LCD. Prvá verzia napájacieho obvodu slúžila pre potreby ladenia obvodu, merania rýchlosti nabíjania kondenzátora pre uskladnenie energie a výber vhodného piezoelektrického meniča.

Na finálnu dosku napájacej časti bol umiestnený aj senzor merania teploty a vlhkosti rovnako aj nízko odberový časovač. Číslicová časť, mikrokontroler s LCD, je umiestnená na samostatnej doske plošného spoja, ktorá sa prepája s napájacou časťou pomocou páskového vodiča. Výsledný riadiaci program mikrokontrolera bol písaný s dôrazom na čo najnižšiu spotrebu, tak aby sme potrebovali pre uschovanie energie čo najmenšiu kapacitu kondenzátora a tým aj menšie množstvo vibrácií potrebných pre chod aplikácie. Pri písaní riadiaceho programu sme využívali vývojové prostredie Code Composer Studio a nadstavbu Energy Trace pre sledovanie spotreby zariadenia.

Výsledné demonštračné zariadenie pre zber elektrickej energie z vibrácií bolo umiestnené do krabičky, ktorá bola navrhnutá v programe Autodesk Inventor. Následne vytlačená na 3D tlačiarňi z PLA filamentu, čím sme rapídne urýchlili návrh a výrobu obalu.

V priebehu testovania zariadenia sme sa stretli s mechanickým poškodením elektronických komponentov zostavy, hlavne samotného meniča, vplyvom samotných vibrácií. Navrhnuté nízko nákladové riešenie za použitia piezo meniča KPSG-100 je funkčné. Z dlhodobého hľadiska s prihliadnutím na životnosť meniča by použitie priemyselného piezoelektrického generátora bolo vhodnejšie.

LITERATÚRA

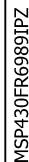
- [1] MATHÚNA, Cian Ó, Terence O'DONNELL, Rafael V. MARTINEZ-CATALA, James ROHAN a Brendan O'FLYNN. Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks. *Talanta* [online]. 2008, **75**(3), 613–623. ISSN 00399140. Dostupné z: doi:10.1016/j.talanta.2007.12.021
- [2] ROUNDY, Shadrach Joseph. Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion. *Optimization* [online]. 2003, **PhD**, 297. ISSN 00222860. Dostupné z: doi:10.1016/j.molstruc.2011.06.030
- [3] OSTASEVICIUS, Vytautas, Vytautas MARKEVICIUS, Vytautas JURENAS, Mindaugas ZILYS, Mindaugas CEPENAS, Laura KIZAUSKIENE a Virginija GYLIENE. Cutting tool vibration energy harvesting for wireless sensors applications. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2015, **233**, 310–318. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2015.07.014
- [4] BEEBY, S P, M J TUDOR a N M WHITE. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology* [online]. 2006, **17**(12), R175–R195. ISSN 0957-0233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/17/12/R01
- [5] AMIRTHARAJAH, Rajeevan a Anantha P. CHANDRAKASAN. Self-powered signal processing using vibration-based power generation. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* [online]. 1998, **33**(5), 687–695. ISSN 00189200. Dostupné z: doi:10.1109/4.668982
- [6] KHERBEET, A.Sh., Hanim SALLEH, B.H. SALMAN a Mohammed SALIM. Vibration-based piezoelectric micropower generator for power plant wireless monitoring application. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* [online]. 2015, **11**, 42–52. ISSN 22131388. Dostupné z: doi:10.1016/j.seta.2015.05.004
- [7] HARB, Adnan. Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy* [online]. 2011, **36**(10), 2641–2654. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2010.06.014
- [8] PRO-WAVE ELECTRONICS CORPORATION. *Piezoelectric Film Sensors* [online]. 1998 [vid. 2017-05-23]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/81206.pdf?_ga=2.100754951.702229027.1495533527-1346296785.1495307348
- [9] ADÁMEK, Petr. *Bakalářská Práce: Klasické i moderní řízení spínaných měničů* [online]. B.m., 2011. ČVUT. Dostupné z: https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/f/f0/Bp_2011_adamek_petr.pdf

- [10] *Buck (step down) converter/regulator* [online]. Dostupné z: <http://www.onmyphd.com/?p=voltage.regulators.buck.step.down.converter&ckattempt=1>
- [11] TEXAS INSTRUMENTS. *Design tips for an efficient non-inverting buck-boost converter* [online]. 2013. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slyt584/slyt584.pdf>
- [12] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. *LTC3588-1 - Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply*. 2011.
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. *MSP430FR698x Datasheet* [online]. [vid. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr6989.pdf>
- [14] *User's Guide MSP430FR6989 LaunchPad™ Development Kit (MSP-EXP430FR6989)* [online]. 2015 [vid. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/slau627a/slau627a.pdf>
- [15] *HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor* [online]. [vid. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf>
- [16] SNAS650 – *TPL5110 Nano-power System Timer for Power Gating* [online]. 2015 [vid. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpl5110.pdf>

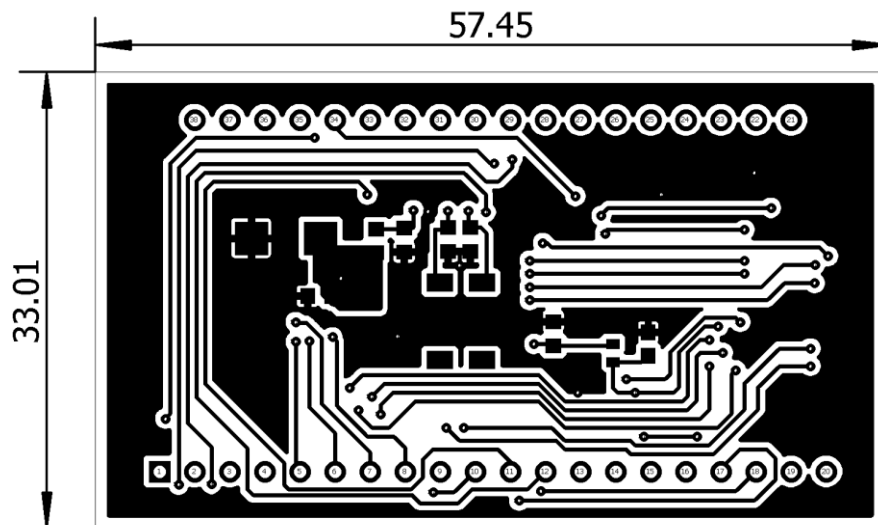
ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

A/D	Analog to Digital, Analógovo číslicový prevodník
CD-ROM	Compact Disk Read Only Memory, Neprepisovateľné optické záznamové médium
DC/DC	Direct Current to Direct Current, Jednosmerný menič
DPS	Doska plošného spoja
FRAM	Ferroelectric Random-Access Memory, Fero elektrická pamäť s priamym prístupom
IDE	Integrated Development Environment, Integrované vývojové prostredie
LCD	Liquid Crystal Display, display s tekutými kryštálmi
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems, Mikro elektromechanické systémy.
MCU	Microcontroller unit, Mikrokontrolér
RISC	Reduced Instruction Set Computer, Počítač s redukovanou inštrukčnou sadou
SPI	Serial Peripheral Interface Bus, Synchronná sériová komunikácia
SRAM	Static Random-Access Memory, Statická pamäť s priamym prístupom
TWI	Two Wire Interface, Rozhranie komunikácie po dvoch vodičoch
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, univerzálny asynchrónny prijímač/vysielač
UVLO	Undervoltage-Lockout, Obvod vypnutia napájania pri podpäti

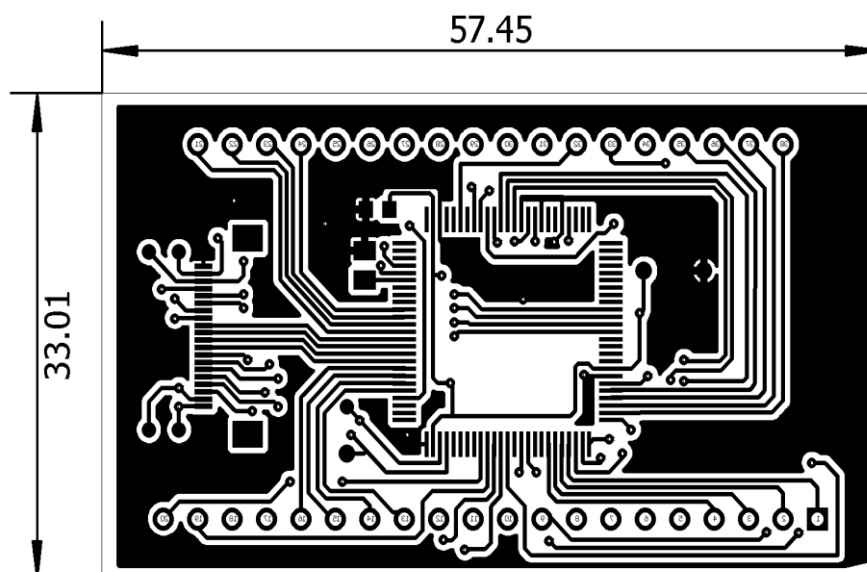
A.1 Schéma zapojenia číslicovej časti



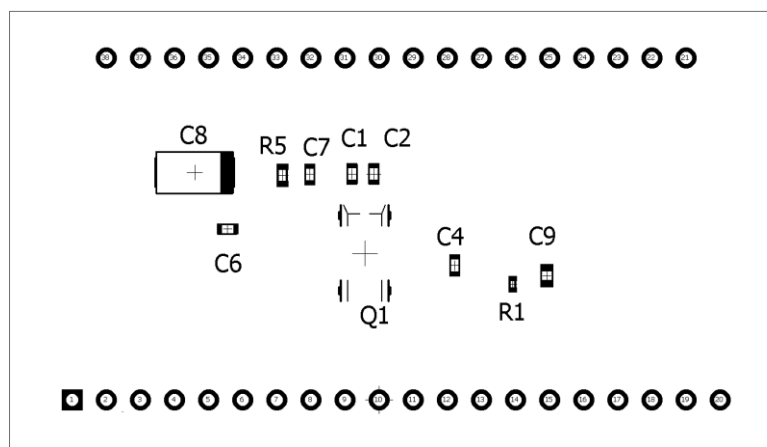
A.2 Doska plošného spoja číslicovej časti TOP



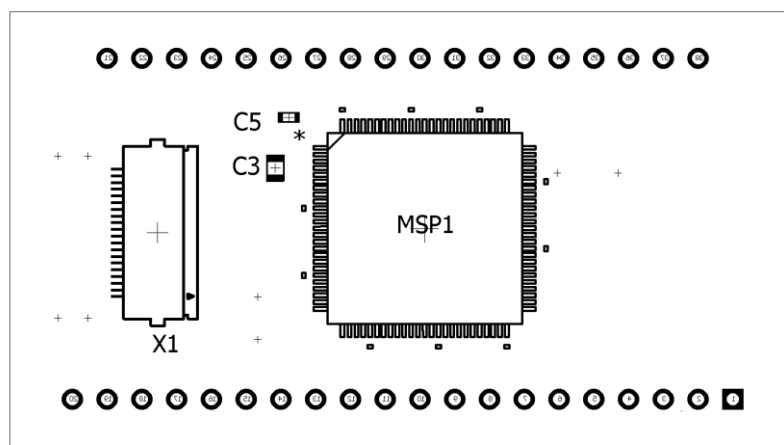
A.3 Doska plošného spoja číslicovej časti BOTTOM



A.4 Osadzovací plán číslicové části TOP

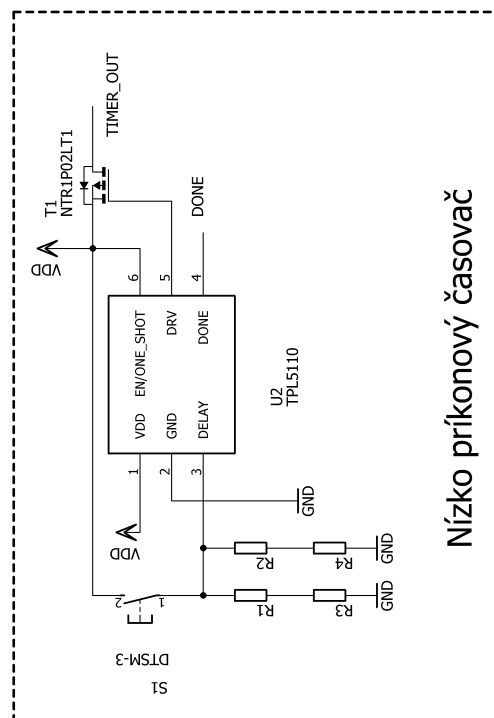
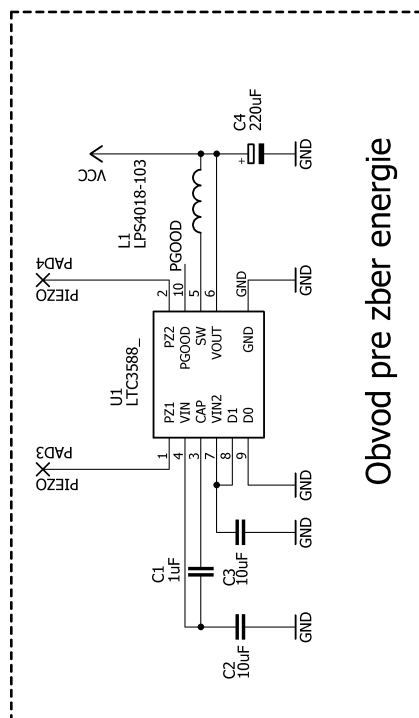
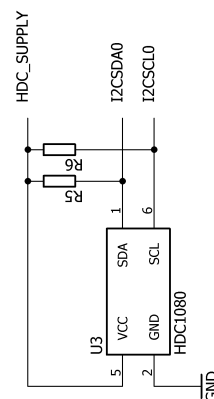
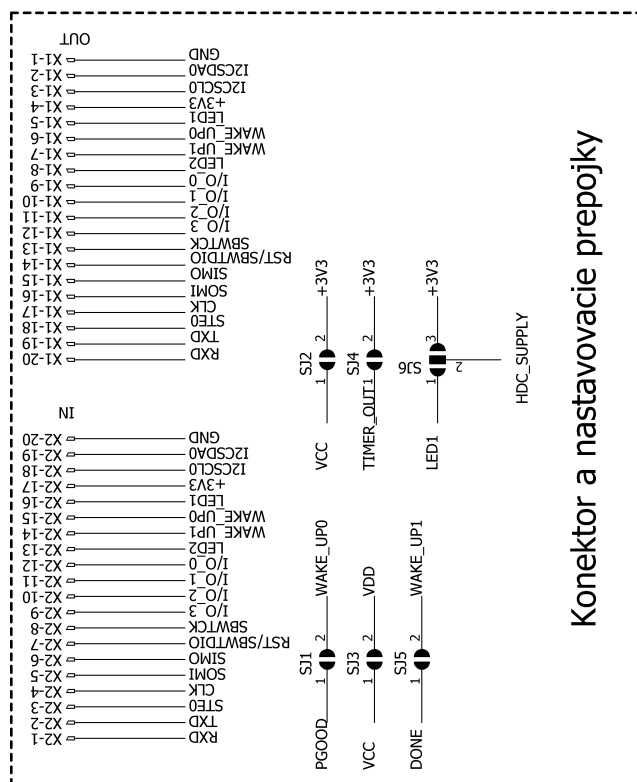


A.5 Osadzovací plán číslicové části BOTTOM

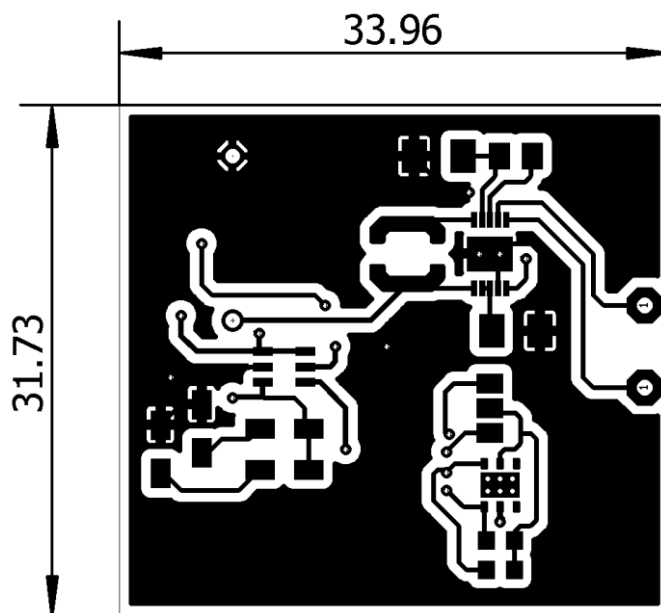


B NÁVRH NAPÁJACEJ ČASTI

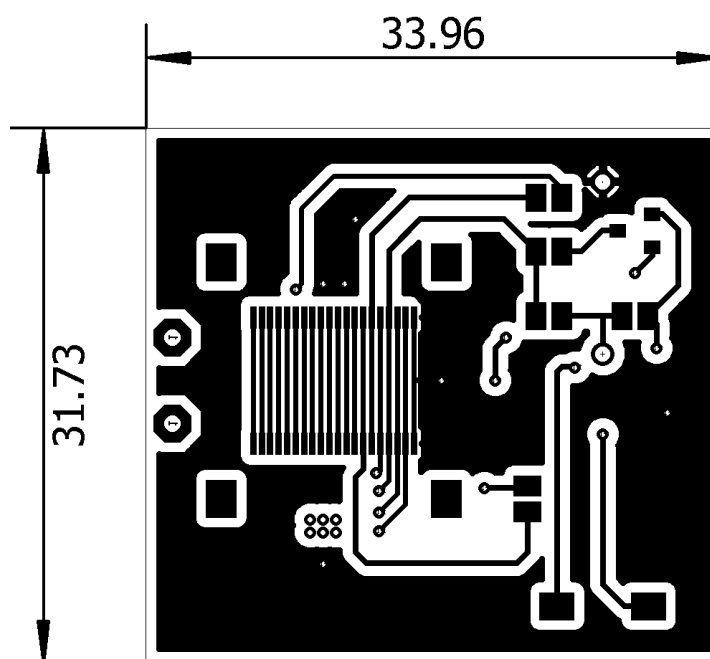
B.1 Schéma zapojenia napájacej časti



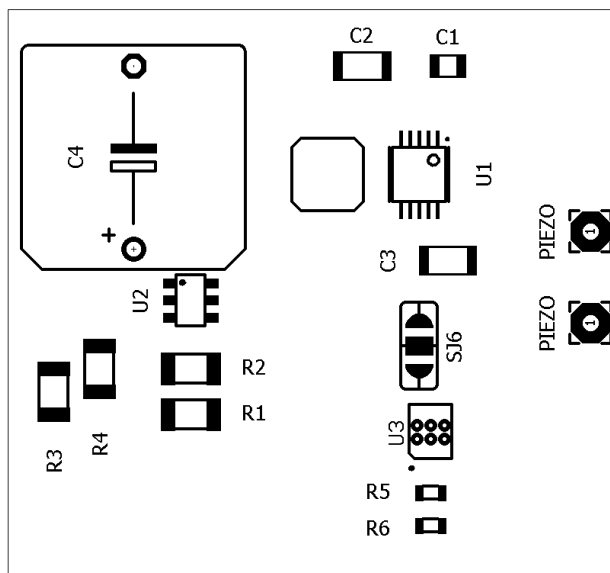
B.2 Doska plošného spoja napájacej časti TOP



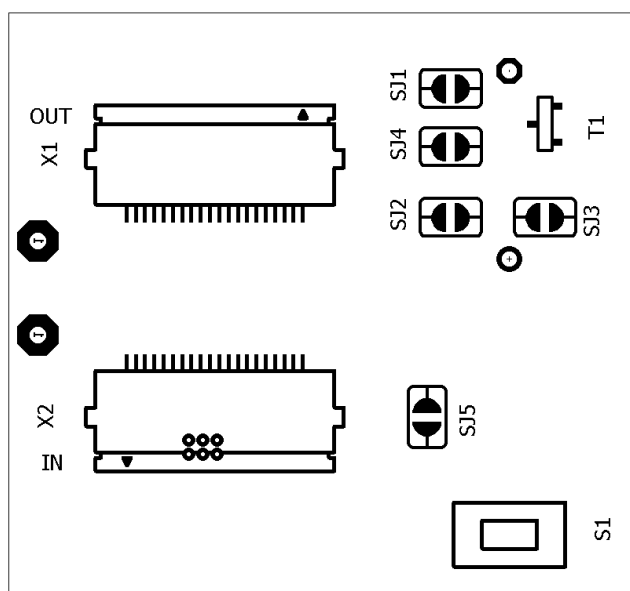
B.3 Doska plošného spoja napájacej časti BOTTOM



B.4 Osadzovací plán napájecí části TOP



B.5 Osadzovací plán napájecí části BOTTOM



C ZOZNAM POUŽITÝCH SÚČIASTOK

C.1 Číslicová časť

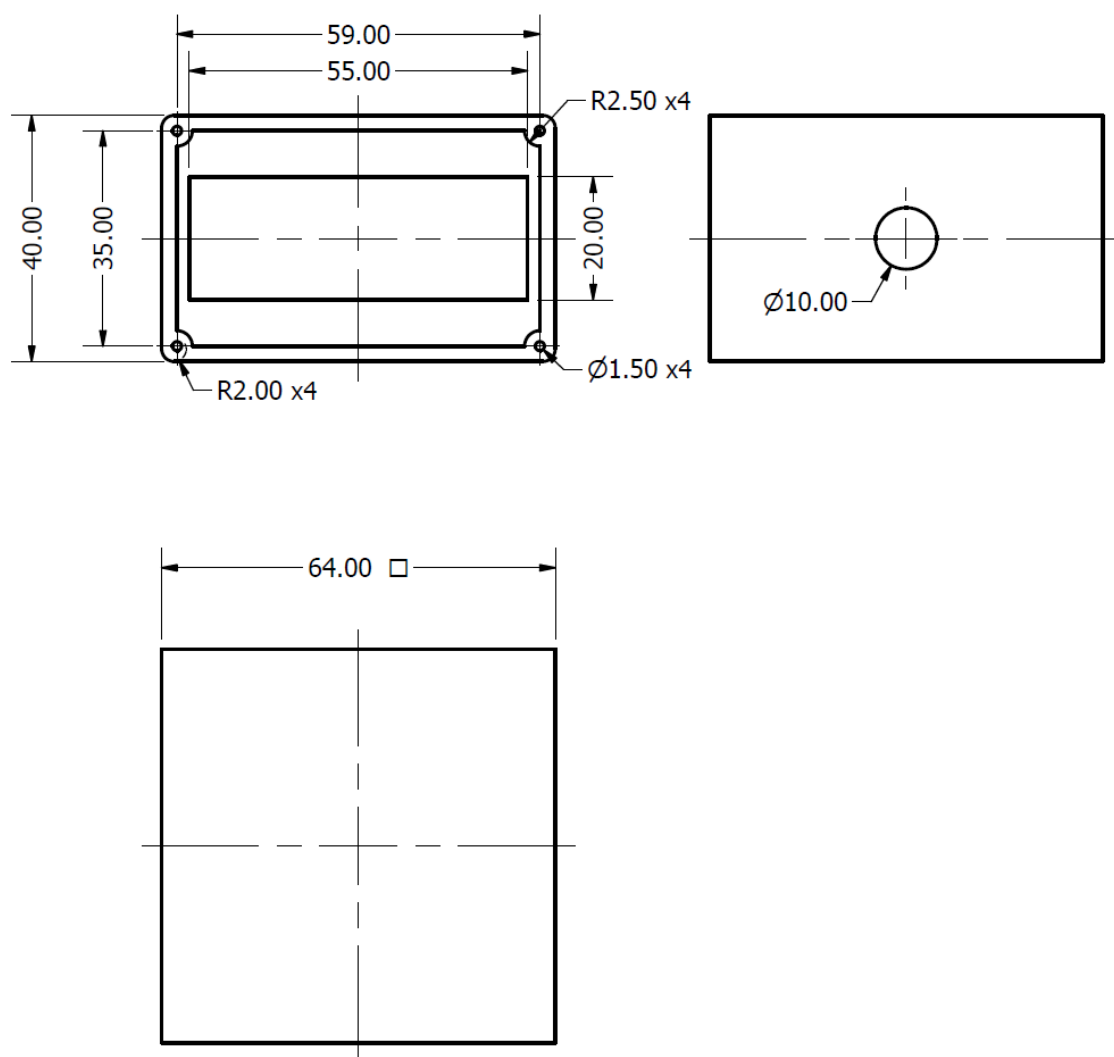
Označenie	Hodnota	Komponent	Puzdro
C1	10p	Kondenzátor	C0603K
C2	10p	Kondenzátor	C0603K
C3	4.7u	Kondenzátor	C0805K
C4	100n	Kondenzátor	C0603K
C5	100n	Kondenzátor	C0603K
C6	100n	Kondenzátor	C0603K
C7	100n	Kondenzátor	C0603K
C8	47u	Kondenzátor	SMC_C
C9	1n	Kondenzátor	C0603
LCD1	-	LCD	FH1138P
MSP1	MSP430FR6989IPZ	MCU	100LQFP
Q1	32.768kHz	Kryštál	MM20SS
R1	10k	Rezistor	R0402
R5	0R	Rezistor	R0603
TP1	TPTP12R	Testovací bod	TP12R
TP2	TPTP12R	Testovací bod	TP12R
TP3	TPTP12R	Testovací bod	TP12R
TP4	TPTP10R	Testovací bod	TP10R
TP5	TPTP10R	Testovací bod	TP10R
TP6	TPTP10R	Testovací bod	TP10R
TP7	TPTP10R	Testovací bod	TP10R
TP8	TPTP10R	Testovací bod	TP10R
X1	FH12-20S-0.5SH	Konektor pre FPC/FFC	FH12-20S-0.5SH

C.2 Napájacia časť

Označenie	Hodnota	Komponent	Puzdro
C1	1uF	Kondenzátor	C0805K
C2	10uF	Kondenzátor	C1206K
C3	10uF	Kondenzátor	C1206K
C4	220uF	Kondenzátor	B45181D
L1	LPS4018-103	Cievka	LPS4018
PAD3	-	PAD	2,15/1,0
PAD4	-	PAD	2,15/1,0
R1	820R	Rezistor	R1206W
R2	-	Rezistor	R1206W
R3	124k	Rezistor	R1206W
R4	-	Rezistor	R1206W
R5	10k	Rezistor	R0603
R6	10k	Rezistor	R0603
S1	DTSM-3	DTSM-3	DTSM-3
SJ1	0R	Rezistor	R0603
SJ2	0R	Rezistor	R0603
SJ3	0R	Rezistor	R0603
SJ4	0R	Rezistor	R0603
SJ5	0R	Rezistor	R0603
SJ6	0R	Rezistor	R0603
T1	NTR1P02LT1	MOS FET	SOT-23
U1	LTC3588_	LTC3588_	MSOP-10-GNDPAD
U2	TPL5110	Časovač	SOT-23
U3	HDC1080	HDC1080	WSON6
X1	FH12-20S-0.5SH	Konektor pre FPC/FFC	FH12-20S-0.5SH
X2	FH12-20S-0.5SH	Konektor pre FPC/FFC	FH12-20S-0.5SH

D NÁVRH KRABÍČKY

D.1 Technický výkres krabíčky



D.2 Technický výkres viečka na krabičku

